



**Sara Cristina Tomás Cardoso**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

## **Comparação dos valores da resistência do betão à compressão obtidos através de ensaios em provetes cúbicos e cilíndricos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutora Carla Alexandra da Cruz Marchão, FCT/UNL

Co-orientador: Prof. Doutor António Manuel Pinho Ramos, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Vicente da Silva

Arguentes: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogais: Prof. Doutora Carla Alexandra da Cruz Marchão



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março, 2017**

**Comparação dos valores de resistência do betão à compressão obtidos através de ensaios em provetes cúbicos e cilíndricos**

Copyright © Sara Cristina Tomás Cardoso, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Para a minha Vóvó,  
A estrela mais bonita que está no céu.*



# Agradecimentos

Primeiro, agradeço à minha orientadora Professora Carla Marchão e co-orientador Professor António Pinho Ramos pelo acompanhamento, ajuda, disponibilidade e conhecimentos transmitidos ao longo da realização deste trabalho. Um obrigado mais pessoal à Prof. Carla, por ser uma espécie de ídolo para mim desde que a conheci.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa pelas instalações e utensílios colocados à minha disposição.

Um obrigado aos técnicos de laboratório destas duas universidades, José Gaspar e Jorge Silvério, Leonel Silva e Pedro Costa por toda a disponibilidade e ajuda na realização de todo o trabalho experimental. Um agradecimento particular, ao Jorge Silvério e ao Pedro Costa, pela especial atenção, compreensão e amizade no decorrer dos trabalhos.

Agradeço às empresas Concremat, Sonangil, Secil e Lenobetão por os betões fornecidos para que esta dissertação fosse possível.

Agradeço igualmente ao Francisco Vasconcelos, Manuel Santos, Nuno Dinarte Gouveia e Rafael Serôdio, por me terem ajudado inicialmente nos ensaios.

Um agradecimento especial à minha amiga Marta Martins, por me ter ajudado com os ensaios quando estive com uma pneumonia e não conseguia fazer nada sozinha.

À Anabela Leal, Francisco Simões, João Cruz, Manuela Chinita, Paulo Matos, Rodrigo Giollo e Ruben Borges por toda a amizade, carinho e força demonstrada ao longo destes anos.

A todos os outros amigos, que de alguma forma me apoiaram e incentivaram na realização deste trabalho.

Um agradecimento especial e do tamanho do mundo à minha “Mamã” e ao meu “Paizão” por todos os sacrifícios que fizeram ao longo destes anos para que eu nunca deixasse de estudar, toda a força, amor, carinho, compreensão (e sermões) que me deram em prol do meu bem. Não há palavras no mundo que possam descrever o enorme amor e admiração que sinto por ambos.



# Resumo

---

O betão é o material de construção mais utilizado no mundo ocidental. Para o seu uso em engenharia civil é necessário conhecer várias propriedades, sendo a resistência à compressão a mais importante, dado que a função principal deste material é resistir às tensões de compressão.

Para a quantificação desta propriedade são efetuados ensaios experimentais em provetes de forma cúbica, cilíndrica ou prismática de dimensões regulamentares submetidos a uma solicitação axial até à sua rotura com uma determinada velocidade de carregamento. Uma vez que certos fatores, como a forma, dimensão dos provetes e velocidade de carregamento têm influência no valor da resistência medida os métodos de ensaio são normalizados.

Ao longo dos anos têm sido realizados diversos estudos nesta área, tendo sido obtidas relações de resistência à compressão entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos de dimensões normalizadas diferentes de 0.80, valor definido na atual norma NP EN 206-1 e no Euro código 2 e onde sugerem a alteração da relação na mesma.

Esta dissertação pretende contribuir para um estudo mais alargado desta matéria seguindo todas as especificações e procedimentos regulamentares previsto na norma NP EN 12390-3.

Para tal foram realizadas diversas betonagens e ensaiados a várias idades (entre 7 e 225 dias) provetes cúbicos de 100 mm e 150 mm de aresta e provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Pretende-se estudar também a influência, na resistência obtida, de vários fatores como: o tipo de cura, a idade do betão, as características da máquina de compressão utilizada e a velocidade de aplicação da carga durante o ensaio.

**Palavras-chave:** Betão, resistência à compressão, provetes cúbicos, provetes cilíndricos





# Abstract

---

Concrete is the most commonly used construction material in the occidental world. Its main function is to withstand compression stresses, witch makes compressive strength the most important property we need to kNow for its correct and safety use in civil engineering.

In order to quantify this property, experimental tests are carried out on cubic, cylindrical or prismatic specimens with specific dimensions which are submitted to an axial load with a rate of application until they reach failure. These experimental methods are standartized because some factors influence its resistance value, such as the shape and size of the test specimens and the loading rate.

Over the years, a lot of studies have been carried out in this area. Compressive strength ratios obtained between cylindrical specimens and cubic specimens of standard sizes are different from 0.80, which is the value defined in the current standard NP EN 206-1 and in Eurocode 2, whereby these studies suggest a change of value in this relationship.

This thesis intends to contribute to a broader study of this matter following all the specifications and standart procedures foreseen in the standart norm NP EN 12390-3.

For this purpose, several types of concrete were tested at various ages (between 7 and 225 days) the specimens used were in cubic shape with 100 mm and 150 mm of edge, and in cylindrical shape with 150 mm of diameter and 300 mm in height. It is also intended to study the influence in the obtained resistance of several factors such as: the cure conditions, the concrete age, the compression machine used and the rate of loading during the test.

**Keywords :** Concrete, Concrete Strength, Cubic Specimens, Cilindric Specimens



# Lista de siglas e símbolos

## Siglas

ACI	American Concrete Institute
CEB	Comité Européen du Béton
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FIB	Fédération Internationale du Béton
IST	Instituto Superior Técnico
UL	Universidade de Lisboa
UNL	Universidade Nova de Lisboa
APEB	Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto
C	Betão
LC	Betão Leve
CEM	Cimento

## Símbolos

### Letras minúsculas latinas

$f_{cm}$	Valor característico da resistência do betão à compressão
$\bar{f}_{cm}$	Valor médio da resistência do betão à compressão
$n$	Número de amostras utilizadas
$f_{ci}$	Valor da resistência do betão à compressão de cada amostra
$\bar{f}_{cm,cub100}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de 3 amostras de provetes cúbicos padrão (100 mm x 100 mm x 100 mm).
$\bar{f}_{cm,cub150}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de 3 amostras de provetes cúbico padrão (150 mm x 150 mm x 150 mm).
$\bar{f}_{cyl}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de 3 amostras de provetes

cilíndricos padrão ( $\varnothing$  150 mm x 300 mm).

$\varnothing$  Diâmetro de um provete cilíndrico.

### **Letras maiúsculas latinas**

A/C - Quociente entre a dosagem de água e a dosagem de cimento

G – Dosagem de Agregado Grosso

P – Dosagem de pórfiro

SP - Superplastificante

D10 – Dosagem de agregado com dimensão média de 10 mm

D14 - Dosagem de agregado com dimensão média de 14 mm

D20 - Dosagem de agregado com dimensão média de 20 mm

$A_c$  - Área da secção transversal do provete.

$F$  – Força aplicada num provete

$P$  – Peso de um provete

$R$  – Coeficiente de Determinação de uma regressão linear

### **Letras minúsculas gregas**

$\gamma$  – Massa volúmico de uma amostra

$\delta$  – Coeficiente de variação de um conjunto de 3 ensaios de provetes

# Índice de Matérias

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento Geral.....	11
1.2. Objetivos da dissertação.....	1
1.3. Organização da Dissertação .....	2
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>3</b>
2.1 Introdução .....	3
2.2 Trabalhos relevantes realizados .....	3
2.2.1 A. M. Neville (1975).....	3
2.2.2 FIP-CEB (1990) .....	4
2.2.3 David J. Elwell e Gongkang Fu (1995).....	4
2.2.4 M. Imam, L. Vandewalle, F. Mortelmans (1995) .....	55
2.2.5 W.C. Leung e K.S. Ho (1996).....	7
2.2.6 Seong-Tae, Yi Eun-Ik Yang e Joong-Cheol Choi (2005) .....	8
2.2.7 A.S. Malaikah (2005).....	100
2.2.8 NP EN 206-1 (2007) .....	12
2.2.9 M.V. Krishna Rao, P.Rathish Kumar, B. Srinivas (2010).....	13
2.2.10 Ali Ergun, Gökhan Kurklu (2012) .....	14
2.2.11 L. Maia, C. Caetano e M. Correira (2012) .....	15
2.2.12 R.N. Nibudey, P.B. Nagarnaik, D.K. Parbat, A. Pande (2013).....	17
2.2.13 N. Zabihi e Ö. Eren (2014).....	1818
2.2.14 Hemraj R. Kumavat, Vikram J. Patel (2014) .....	19
2.2.15 Mohammed Kareem Abd, Zuhair Dhaher Habeeb (2014).....	20
2.2.16 Saurav, Ashok Kumar Gupta (2014).....	21
2.2.17 Rajiv Banarjee, Md. Abid Alam, Zeeshan Ahmad, (2015) .....	22
2.2.18 Ali Jihad Hamad, (2015) .....	23
2.3 Compilação dos trabalhos anteriores.....	24
<b>3. Resistência à Compressão do Betão.....</b>	<b>27</b>
3.1 Definição .....	27

3.2 Classificação do betão.....	27
3.3 Preparação das superfícies .....	28
3.4 Fatores que influenciam a resistência à compressão .....	29
3.4.1 Porosidade e Índice de Vazios .....	30
3.4.2 Relação A/C .....	311
3.4.3 Tipo de Cimento.....	32
3.4.4 Aditivos .....	344
3.4.5 Água de Amassadura.....	35
3.4.6 Agregados .....	36
3.4.7 Adjuvantes.....	36
3.4.8 Idade .....	38
3.4.9 Compactação .....	38
3.4.10 Moldes de fabrico.....	39
3.4.11 Cura .....	40
3.4.12 Causas acidentais.....	42
<b>4. Programa Experimental .....</b>	<b>43</b>
4.1 Betonagem dos provetes.....	43
4.2 Requisitos dos ensaios.....	45
4.2.1 Medições .....	45
4.2.2 Moldes.....	46
4.2.3 Provetes .....	46
4.3. Equipamentos Utilizados.....	47
4.3.1 Máquina de compressão - Prensa .....	47
4.3.2 Instrumentação .....	478
4.4 Ensaio Normalizado .....	48
4.4.1 Procedimento experimental.....	48
4.4.2 Aplicação da carga .....	49
4.4.3 Tipo de rotura.....	50
4.5 Composições dos betões utilizados .....	53
4.5.1 Betonagens realizadas na CONCREMAT .....	53
4.5.2 Betonagens realizadas na LENO BETÃO.....	54
4.5.3 Betonagens realizadas na SECIL .....	54
4.5.4 Betonagens realizadas na SONANGIL .....	55
4.5.5 Betonagens realizadas na FCT/UNL.....	56

<b>5. Análise de Resultados.....</b>	<b>57</b>
5.1 Resultados .....	57
5.1.1 Resultados aos 7 dias.....	57
5.1.2 Resultados aos 14 dias.....	60
5.1.3 Resultados aos 28 dias.....	62
5.1.4 Resultados obtidos para betões de outras idades.....	666
5.1.5 Resultados de M. Inácio, 2016: .....	67
5.1.6 Resultados de N. Gouveia, 2016: .....	69
5.1.7 Resultados de C. Marchão, 2015:.....	71
5.1.8 Resultados de A. Almeida, 2016:.....	72
5.1.9 Resultados de R. Honório, 2016: .....	73
5.2 Influência da Velocidade de Ensaio .....	74
5.3 Influência do Equipamento Utilizado.....	75
5.4 Influência da Idade .....	76
5.5 Influência do Tipo de Cura.....	76
 <b>6. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....</b>	 <b>81</b>
 <b>Referências Bibliográficas .....</b>	 <b>83</b>





# Índice de Figuras

Figura 2.1 - Relação de resistências obtida entre provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> e cilindros de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura).....	10
Figura 2.2 - Relação entre cilindros de Ø150x 300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e cubos de 150 x150x150 mm <sup>3</sup> .....	12
Figura 3.1 - Relação entre a porosidade e a resistência à compressão.....	30
Figura 3.2 - Relação entre a resistência do betão e a relação A/C e volume.....	31
Figura 3.3 - Relação entre resistência e relação A/C obtida para betão de 7 dias de idade feito com cimento Portland de endurecimento rápido.....	32
Figura 3.4 - Variação com o tempo, da resistência à compressão de pastas dos principais componentes puros do cimento Portland.....	33
Figura 3.5 - Influência da dosagem de cimento nas percentagens resistências à compressão e à flexão.....	34
Figura 3.6 - Relação entre a resistência à compressão do betão e a sua idade em meses.....	38
Figura 3.7 - Exemplo de agulha vibratória.....	39
Figura 3.8 - Resistência à compressão de um betão sem cura e com diversas fases de cura .....	41
Figura 3.9 - Influência da temperatura na resistência à compressão de um betão de acordo com a sua idade.....	41
Figura 4.1 - Moldes cúbicos e cilíndricos utilizados.....	43
Figura 4.2 - Enchimento de carrinhos de mão com betão.....	43
Figura 4.3 – Enchimento dos moldes e vibração inicial.....	44
Figura 4.4 – Vibração final dos moldes.....	44
Figura 4.5 – Acabamento das superfícies.....	45
Figura 4.6 - Provetes após betonagem.....	45
Figura 4.7 - Dimensões normalizadas de provetes.....	46
Figura 4.8 - Máquinas de Ensaio.....	47
Figura 4.9 - Esquema de montagem dos defletómetros verticais.....	48

Figura 4.10 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos.....	50
Figura 4.11 - Roturas satisfatórias em provetes cilíndricos.....	50
Figura 4.12 - Roturas não satisfatórias em provetes cúbicos.....	51
Figura 4.13 - Roturas não satisfatórias em provetes cilíndricos.....	51
Figura 4.14- Valor característico da resistência.....	52
Figura 5.1 – Rotura de provetes cúbicos.....	58
Figura 5.2 – Rotura de um provete cilíndrico de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) aos 7 dias de idade.....	58
Figura 5.3 – Relação de resistências obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> aos 7 dias de idade .....	59
Figura 5.4 – Relação de resistências obtida utilizando provetes cúbicos de 100x100x100 mm <sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> aos 7 dias de idade.....	59
Figura 5.5 - Rotura de provetes cúbicos.....	60
Figura 5.6 - Rotura de um provete de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) aos 14 dias de idade.....	60
Figura 5.7 – Relação de resistências obtidas utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> aos 14 dias de idade.....	61
Figura 5.8 – Relação de resistências obtidas utilizando provetes cúbicos de 100x100x100 mm <sup>3</sup> com cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> aos 14 dias de idade.....	62
Figura 5.9 – Rotura de provetes cúbicos.....	62
Figura 5.10 – Rotura de um provete de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) com a presença de defletómetros verticais.....	63
Figura 5.11 – Relação de resistências obtidas utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> aos 28 dias de idade .....	64
Figura 5.12 - Regressão linear feita com a relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> aos 28 dias de idade .....	64
Figura 5.13 - Relação Força (em kN) com Deslocamento (em mm) para 3 ensaios de provetes cúbicos de 100x100x100 mm <sup>3</sup> de aresta aos 28 dias de idade.....	65
Figura 5.14 - Relação Força (em kN) com Deslocamento (em mm) para 3 ensaios de provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> de aresta aos 28 dias de idade.....	65
Figura 5.15 - Relação Força (em kN) com Deslocamento (em mm) para 3 ensaios de provetes cilíndricos de dimensões Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) aos 28 dias de idade.....	66

Figura 5.16 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	67
Figura 5.17 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cúbicos de 100x100x100 mm <sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	67
Figura 5.18 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	68
Figura 5.19 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	70
Figura 5.20 - Relação de resistência obtida utilizando provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> e de 100x100x100 mm <sup>3</sup> .....	70
Figura 5.21 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	71
Figura 5.22 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cúbicos de 100x100x100 mm <sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	72
Figura 5.23 - Regressão linear feita com a relação de provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) com provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	73
Figura 5.24 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	74
Figura 5.25 – Relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> em função da idade.....	77
Figura 5.26 – Relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm <sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> em função da idade.....	77
Figura 5.27 – Relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> em função da idade.....	78
Figura 5.28 – Relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm <sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> em função da idade.....	78



# Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores de resistência à compressão obtidos (em MPa) em provetes cúbicos e cilíndricos para diferentes tipos de betão. ....	4
Tabela 2.2 - Composição utilizada para as dezoito misturas feitas de betão de alta resistência ...	6
Tabela 2.3 - relações de resistência à compressão obtidas para provetes cúbicos e cilíndricos obtidas para os diferentes tipos de moldes .....	6
Tabela 2.4 - Relações de resistência obtidas entre provetes cilíndricos e cubos para diferentes tipos de molde de fabrico .....	7
Tabela 2.5 - Valores de resistência à compressão obtidos para as várias dimensões de cubos de acordo com a designação do projeto (fabricante) que forneceu o betão .....	8
Tabela 2.6 - Composição das quatro misturas utilizadas .....	9
Tabela 2.7 - Valores de resistência à compressão (em MPa) obtidos e relações entre eles .....	9
Tabela 2.8 - Composição do betão do grupo I e respetiva relação de resistência obtida entre provetes cilíndricos e cúbicos .....	11
Tabela 2.9 - Composição do betão do grupo II e respetiva relação de resistência obtida entre provetes cilíndricos e cúbicos .....	11
Tabela 2.10 - Composição do betão do grupo III e respetiva relação de resistência obtida entre provetes cilíndricos e cúbicos .....	11
Tabela 2.11 - Quadro 7 do NP EN 206-1 para relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm <sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos 150x150x150 mm <sup>3</sup> .....	13
Tabela 2.12 - Valores de resistência à compressão obtidos, e respetivas relações em betão não reforçado .....	13
Tabela 2.13 - Valores de resistência à compressão obtidos, e respetivas relações em betão reforçado com fibras de vidro .....	14
Tabela 2.14 - Correspondência entre series testadas e tipos de betão associados. ....	15
Tabela 2.15 - Resistência à compressão média (em MPa) obtida em provetes de dimensões normalizadas aos 28, 56 e 90 dias de idade.....	15
Tabela 2.16 - Relação de resistência à compressão entre cilindros e cubos para as várias idades e tipos de cura em função do tipo de betão .....	15
Tabela 2.17 - Tipos de amostras utilizadas .....	16

Tabela 2.18 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) obtidos para cada amostra de acordo com o tipo de molde .....	16
Tabela 2.19 - Valores de resistência à compressão obtidos em provetes cúbicos e cilíndricos em MPa de betão normal endurecido (0 % ).....	17
Tabela 2.20 - Relações obtidas para a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos em betões reforçados com PFRC com proporções diferentes.....	18
Tabela 2.21 - Relação de resistência à compressão obtida em função do tipo de classe do betão ensaiado.....	18
Tabela 2.22 - Composição de betão de nível I e de nível II.....	18
Tabela 2.23 - Relações de resistência à compressão obtidas em provetes cúbicos e cilindros para betões de Nível I em função do tipo de cura.....	19
Tabela 2.24 - Relações de resistência à compressão obtidas em provetes cúbicos e cilindros para betões de Nível II em função do tipo de cura.....	19
Tabela 2.25 - Composições da mistura utilizadas e respetiva relação de resistência entre provetes cilíndricos e cúbicos .....	20
Tabela 2.26 - Valores de resistência à compressão (em MPa) de provetes de dimensões normalizadas e respetiva relação dos mesmos .....	21
Tabela 2.27 - Relação de resistência à compressão (em MPa) de provetes cilíndricos com provetes cúbicos aos 3, 7 e 28 dias de idade .....	22
Tabela 2.28 - Composição das misturas betuminosas utilizadas.....	22
Tabela 2.29 - Resistência à compressão (em MPa) de provetes cúbicos de betão aos 7 e 28 dias de idade.....	23
Tabela 2.30 - Composição da mistura.....	23
Tabela 2.31 - Resultados obtidos de resistência à compressão (em MPa) e respetivas relações de resistência entre provetes aos 7 dias de idade.....	24
Tabela 2.32 - Resultados obtidos de resistência à compressão (em MPa) e respetivas relações de resistência entre provetes aos 28 dias de idade.....	24
Tabela 2.33 - Resumo das relações de resistência obtidas pelos autores referidos anteriormente.....	25
 Tabela 3.1 - Classificação de Resistência à Compressão do Betão.....	 28
Tabela 3.2 - Classificação de Resistência á Compressão do betão leve.....	28
 Tabela 4.1 - Composição do betão da CONCREMAT em kg/m <sup>3</sup> .....	 53

Tabela 4.2 - Composição do betão da LENOBETÃO em kg/m <sup>3</sup> .....	54
Tabela 4.3 - Composição do betão da LENOBETÃO em kg/m <sup>3</sup> .....	54
Tabela 4.4 - Composição do betão da SECIL em kg/m <sup>3</sup> .....	54
Tabela 4.5 - Composição do betão da Sonangil em kg/m <sup>3</sup> .....	55
Tabela 4.6 - Composição do betão da Sonangil em kg/m <sup>3</sup> .....	55
Tabela 4.7 - Composição do betão da Sonangil em kg/m <sup>3</sup> .....	55
Tabela 4.8 - Composição do betão da FCT/UNL em kg/m <sup>3</sup> .....	56
Tabela 5.1 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) aos 7 dias de idade.....	58
Tabela 5.2 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) aos 14 dias de idade.....	61
Tabela 5.3 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) aos 28 dias de idade.....	63
Tabela 5.4 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) para várias idades.....	66
Tabela 5.5 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) a várias idades(em dias) .....	68
Tabela 5.6 - Resultados de resistência à compressão para betões normais aos 60 dias de idade (em MPa).....	69
Tabela 5.7 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) para betões reforçados com fibras aos 60 dias de idade (em MPa) .....	69
Tabela 5.8 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) aos 28 dias de idade .....	71
Tabela 5.9 - Resultados de resistência à compressão (em MPa).....	72
Tabela 5.10 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) a várias idades .....	73
Tabela 5.11 - Valores de velocidade utilizados para provetes cúbicos de 150x150x150 mm <sup>3</sup> e 100x100x100 mm <sup>3</sup> .....	75
Tabela 5.12 - Valores de resistência à compressão (em MPa), coeficientes de variação obtidos em laboratórios diferentes.....	75
Tabela 5.13 - Relações de resistência entre provetes obtidas em laboratórios diferentes.....	76
Tabela 5.14 - Relações de resistência entre provetes obtidas de acordo com as idades do betão.....	76
Tabela 5.15 - Relações de resistência à compressão obtidas para provetes curados ao ar.....	79
Tabela 5.16 - Relações de resistência à compressão obtidas para provetes curados em água....	79





# **1. Introdução**

## **1.1. Enquadramento Geral**

Uma das principais características mecânicas do betão é a sua resistência à compressão.

O conhecimento deste valor é fundamental para o dimensionamento otimizado da estrutura e consequentemente para um melhor desempenho em termos de estados limite últimos. Para a obtenção deste parâmetro recorre-se a ensaios de compressão em provetes moldados normalizados (cubos, cilindros ou prismas) que obedecem a determinadas especificações.

Ao longo dos anos têm sido efetuados vários estudos que têm conduzido a resultados contraditórios no que diz respeito à relação de resistência obtida utilizando cilindros com 150 mm de diâmetro (e cuja altura é duas vezes o diâmetro) e cubos com 150 mm de aresta.

A utilização de cubos de 100 mm de aresta é relativamente recente e surgiu com o desenvolvimento de betões de elevada resistência. Deste modo, são poucos os trabalhos que apresentam a relação entre as resistências obtidas com 150 mm de aresta e cubos com 100 mm de aresta pelo que esta dissertação pretende contribuir para o estabelecimento desta relação.

De acordo com a NP EN 206-1[1] a resistência à compressão obtida utilizando provetes cúbicos de 150 mm de aresta conduz a resultados superiores à resistência obtida através de provetes cilíndricos estando preconizada uma relação entre os mesmos de 0.80.

Em estudos recentes realizados como [2], [3], [4], [5] obtiveram-se relações significativamente superiores. Pretende-se então, com esta dissertação realizar um estudo mais alargado, com vista à obtenção de uma relação de resistências mais representativa.

## **1.2 Objetivos da dissertação**

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo da relação entre as resistências do betão obtidas através de ensaios em provetes cúbicos e cilíndricos, para várias idades do betão (entre 7 e 215 dias) e diferentes composições e resistências.

Pretende-se estudar também a influência, na resistência obtida, de vários fatores como: a composição do betão, a cura, a idade, a máquina de compressão e a velocidade de aplicação da carga durante o ensaio.

Todos os ensaios experimentais foram realizados de acordo com as especificações previstas na NP EN 12390-3 [6].

## **1.3 Organização da Dissertação**

A presente dissertação está organizada em seis capítulos, constituídos do seguinte modo:

Capítulo 1, que consiste no enquadramento geral do tema, os objetivos a que esta dissertação se propõe e a organização da mesma;

Capítulo 2, é um resumo dos trabalhos de investigação anteriores a que foi possível um acesso, através da descrição dos ensaios experimentais realizados assim como resultados obtidos e respetivas conclusões.

Capítulo 3, onde é abordado o conceito de resistência à compressão, a sua importância em engenharia civil e quais os fatores que influenciam e afetam o seu valor.

Capítulo 4, são elaboradas as etapas realizadas durante o procedimento experimental, desde a realização das betonagens, descrição dos procedimentos de ensaio, especificações e dimensões de moldes e provetes, os tipos de rotura aceitáveis e não aceitáveis e como são este tipo de resultados expressos assim como as suas variâncias.

Capítulo 5, onde se procede ao tratamento de dados e respetiva análise dos resultados obtidos.

Capítulo 6, onde se apresentam as conclusões relativamente aos ensaios experimentais e aos resultados obtidos e onde se propõem possíveis desenvolvimentos futuros do tema.

## **2. Estado da Arte**

### **2.1 Introdução**

Foi efetuada uma pesquisa sobre trabalhos feitos neste tema, para melhor percepção dos resultados obtidos até ao presente. Há poucas avaliações disponíveis no que diz respeito à comparação da resistência à compressão entre provetes cúbicos de  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  e de  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ , pois a maioria das publicações existentes efetuam indiretamente comparações de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de  $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^2$  (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ . No texto seguinte, ambas serão abordadas.

### **2.2 Trabalhos relevantes realizados**

Na presente secção incluem-se os seguintes trabalhos dos investigadores:

- A.M. Neville
- FIB-CEB
- David J- Elwell e Gongkang Fu
- M. Imam, L. Vandewalle e F. Mortelmans
- W.C. Leung e K.S. Ho
- Seong-Tae, Yi Eun-Ik Yang e Joong-Cheol Choi
- A.S. Malaikah
- M.V. Krishna Rao, P.Rathish Kumar e B. Srinivas
- Ali Ergun, Gokhan Kurklu
- L. Maia, C. Caetano e M. Correia
- R.N. Nibudey, P.b. Nagarnaik, D.K. Parbat e A. Pande
- N. Zabihi e O. Eren
- Hemraj R. Kumavat e Vikram J. Patel
- Mohammed Kareem Abd e Zuhair Dhaher Habeeb
- Saurav e Ashok Kumar Gupta
- Rajiv Banarjee, Md. Abid Alam e Zeeshan Ahmad
- Ali Jihad Hamad

De notar, que certas designações destes autores para os tipos de betão, não correspondem às utilizadas na Europa, devido ao facto dos mesmos não pertencerem a países europeus.

#### **2.2.1 A. M. Neville (1975)**

Ho Wei Rong e David Ho [7], citaram que Neville [8], em 1975, refere que o valor médio da relação de resistência entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos é de 0,87 e que o mesmo tende a aumentar consoante a classe de betão.

### 2.2.2 FIP-CEB (1990)

Em 1990, o FIP-CEB [9] (Fédération Internationale de la Précontrainte - Comité Européen du Béton), publicou um estudo onde comparava a resistência axial à compressão de provetes cúbicos de dimensões 150x150x150 mm<sup>3</sup> com a de provetes cilíndricos de dimensões Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura), com cura húmida e com cura em condições ambientes e ensaiados aos 28 dias. As condições experimentais e velocidades de ensaio foram as estabelecidas segundo as normas: ISO 1920, ISO 2736/2 e ISSO 4012, às quais não foi possível acesso.

A tabela 2.1 mostra a relação obtida entre as resistências dos provetes cilíndricos com as resistências dos provetes cúbicos.

Tabela 2.1 - Valores de resistência à compressão obtidos (em MPa) em provetes cúbicos e cilíndricos para diferentes tipos de betão [adaptado de [9]].

Tipo de betão	C12	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80
$f_{cm,cyl}$	12	20	30	40	50	60	70	80
$f_{cm,cub150}$	15	25	37	50	60	70	80	90
$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	0.8	0.80	0.81	0.80	0.83	0.86	0.88	0.89

Foi obtida uma relação média de 0.80 para betões endurecidos normais e de 0.87 para betões com resistência superior a 50 MPa.

### 2.2.3 David J. Elwell e Gongkang Fu (1995)

Em 1995, David J. Elwell e Gongkang Fu [10] elaboraram um relatório, cujo objetivo era obter um grau de comparação entre relações de resistência à compressão com provetes cilíndricos e provetes cúbicos a fim de poder analisar se os ensaios experimentais realizados utilizando provetes cúbicos deveriam ou não substituir os ensaios experimentais realizados utilizando provetes cilíndricos. Não foi disponibilizada a composição dos betões. Neste relatório são citados os estudos prévios feitos pelos seguintes autores nesta área:

- Gonnerman [11], em 1925, testou provetes de forma cúbica de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e 200x200x200 mm<sup>3</sup> com provetes de forma cilíndrica de várias dimensões em ensaios de resistência à compressão tendo sido obtidas relações de 0.85 a 0.88.

- Gyengo [12], em 1938, conclui que a relação de resistência obtidas entre cilindros e cubos varia de 0.65 a 0.84 e explica esta variação com a granulometria do agregado utilizado;

- Evans [13], em 1944, relata que a mesma relação podia variar entre 0.77 e 0.96 dependendo da classe de resistência;

- Cormack [14], em 1956, estipula no seu estudo que a relação entre as resistências obtidas entre cilindros e cubos era de 0.87 embora tenha sido um estudo mais focado em betões de alta

resistência, que na época correspondia a betões com resistência à compressão superior a 41 MPa (6 ksi) ;

- Sigvaldason [15], em 1966, conclui que a relação de resistência obtida entre cilindros e cubos para betão com aparência irregular variava entre 0.71 a 0.77, e que para betão com uma aparência uniforme e regular variava entre 0.76 a 0.84;

- Neville [16], em 1966, sugere que a relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> é de 0.81.

- Plowman, Smith, e Sheriff [17], em 1974, obtiveram uma relação de 0.74 para provetes sujeitos a cura húmida e 0.64 para provetes sujeitos a cura em condições atmosféricas frisando que em todos os casos foram incorporadas pequenas porções de barras de aço nos provetes cilíndricos com a finalidade de reforço;

- Raju e Basavarajaiah [18], em 1976, obtiveram uma relação de resistência entre cilindros e cubos de 0.61 para cubos com 150 mm de aresta e de 0.51 para cubos com 100 mm de aresta;

- Lysle and Johansen [19], em 1979, obtiveram uma relação de resistência entre cilindros e cubos de 0.86;

- Lasisi, Osunade e Olorunnitwo [20], em 1987, obtiveram para a relação de resistência entre cilindros e cubos os valores de 0.55 a 0.86 para provetes de betão;

No fim deste artigo, os autores concluíram que a relação de resistência de provetes cilíndricos com provetes cúbicos variava de 0.65 a 0.90 e que os estudos prévios feitos nesta área não contribuíam o suficiente para provar que os ensaios experimentais em provetes cúbicos deveriam substituir os ensaios experimentais em provetes cilíndricos. Não foram obtidas informações no que diz respeito às velocidades de ensaio utilizadas.

#### **2.2.4 M. Imam, L. Vandewalle, F. Mortelmans (1995)**

Em 1995, M. Imam, L. Vandewalle, F. Mortelmans [21], realizaram uma campanha experimental com o intuito de averiguar se ensaios de resistência à compressão correntes se adaptavam também a betões de alta resistência, assim como a influência do material do molde de fabrico dos provetes no valor de resistência à compressão. Para tal foram testados, aos 28 dias de idade, 18 misturas de betões de alta resistência em provetes de forma cilíndrica de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura), e provetes de forma cúbica com as seguintes dimensões: 100x100x100 mm<sup>3</sup>, 150x150x150 mm<sup>3</sup> e 200x200x200 mm<sup>3</sup>. Foram utilizados moldes de ferro e moldes de plástico no fabrico dos provetes. As velocidades de ensaio utilizadas foram entre 40 MPa a 50 MPa por minuto.

A Tabela 2.2 mostra a composição utilizada para as dezoito misturas de betão de alta resistência que foram preparadas para os ensaios experimentais de resistência à compressão

Tabela 2.2 - Composição utilizada para as dezoito misturas feitas de betão de alta resistência  
(adaptado de [21])

Mistura	Proporções da mistura (kg por m³ de betão)									
	Cimento	Sílica Ativa	SP	Água	Areia 0/5	G4/16	G4/14	P2/7	P7/10	P7/14
1	410	—	12.3	118.9	588	—	958	—	—	—
2	550	82,5	22.1	151.8	641	962	—	—	—	—
3	550	82,5	15.8	151.8	648	—	972	—	—	—
4	500	75.0	14.4	138.0	683	1026	—	—	—	—
5	500	75.0	17.3	143.8	654	—	1067	—	—	—
6	500	50.0	16.5	137.5	672	—	1097	—	—	—
7	500	50.0	16.5	143.0	430	—	—	350	884	—
8	500	50.0	16.5	137.5	700	—	—	—	1051	—
9	500	25.0	15.8	136.5	540	—	—	360	900	—
10	500	25.0	15.8	136.5	720	—	—	—	1080	—
11	500	50.0	16.5	137.5	442	—	—	442	884	—
12	490	—	14.7	142.1	458	—	—	458	917	—
13	490	73,6	18.4	150.9	558	—	—	558	—	558
14	550	82,5	22.1	151.8	535	—	—	535	—	535
15	550	82,5	15.8	151.8	540	—	—	540	—	540
16	500	75.0	14.4	138.0	570	—	—	570	—	570
17	500	75.9	17.3	143.8	430	—	—	430	860	—
18	500	50.9	16.5	137.5	442	—	—	442	884	—

Os algarismos separados por “/” representam a dimensão média dos agregados a que se referem.

Exemplo:

“G4/16” – agregado grosso com partículas de dimensão média entre os 4 mm e os 16 mm.

A Tabela 2.3 mostra as relações de resistência obtidas pelos autores para provetes cilíndricos e cúbicos feitos nos dois tipos de moldes.

Tabela 2.3 - relações de resistência à compressão obtidas para provetes cúbicos e cilíndricos obtidas para os diferentes tipos de moldes (adaptado de [21])

Molde	Ferro		Plástico
Mistura	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
1	0.92	1.01	1.08
2	0.94	1.04	1.05
3	0.90	1.01	1.10
4	0.97	1.07	1.07
5	0.98	1.07	1.08
6	0.98	1.13	1.12
7	0.94	1.06	0.58
8	0.96	1.07	1.09
9	0.92	1.02	1.07
10	0.94	1.07	1.12
11	0.91	1.05	1.13
12	0.95	1.06	1.07
13	0.98	1.06	1.05
14	0.93	1.04	1.10
15	0.95	1.08	1.09
16	0.97	1.01	1.05
17	0.94	1.03	1.08
18	0.96	1.07	1.08

A Tabela 2.4 apresenta como conclusão a média dos valores das relações de resistência entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos obtida pelos autores nos diferentes tipos de molde.

Tabela 2.4 - Relações de resistência obtidas entre provetes cilíndricos e cubos para diferentes tipos de molde de fabrico (adaptado de [21])

Tipo de Molde	Relação de Resistência à Compressão	
	$f_{cm,cyl} / f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100} / f_{cm,cub150}$
Ferro	0.95	1.05
Plástico	—	1.06

Analisando as relações de resistência obtidas, podemos concluir que os autores obtiveram um valor de 0.95 para a relação de resistência obtida entre provetes cilíndricos com provetes cúbicos de 150 mm, e um valor de 1.05 para a relação de resistência obtida com provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> para moldes fabricados em ferro fundido. No que diz respeito aos provetes fabricados em moldes de plástico, esta ultima relação de resistência apresenta um valor de 1.06, valor ligeiramente superior ao obtido com moldes de ferro fundido.

Concluiu-se neste estudo que a resistência à compressão diminui à medida que a dimensão do provete aumenta, e que as resistências medidas em provetes fabricados em moldes de ferro eram superiores às resistências medidas fabricadas em moldes de plástico, este aumento das resistências pode ter sido atribuído à suavidade relativamente mais baixa e planeza das superfícies internas dos moldes de plástico que resultam em mais espaços vazios, defeitos, ou mesmo pequenas convexidades no betão, além de que os moldes de plástico absorvem mais energia do que os de ferro.

### 2.2.5 W.C. Leung e K.S. Ho (1996)

Em 1996, W.C. Leung e K.S. Ho [22], lançam um relatório especial sobre as comparações de valores de resistência à compressão entre provetes cúbicos de 100 mm e de 150 mm.

O mesmo relatório citou o estudo de Neville [23], que em 1977, sugere que a resistência à compressão dos provetes cúbicos de 100 mm é 104% do valor da resistência dos provetes cúbicos de 150 mm.

Neste relatório entre os anos de 1993 e 1995 foram ensaiados 1484 cubos, com condições de cura semelhantes e com idade de 28 dias. As condições de fabrico, preparação, cura e ensaio dos provetes foram executadas conforme a legislação prevista na altura [24] e [25]. A velocidade de aplicação da carga estipulada de acordo com esta norma seria de 0.2 MPa/s a 0.4 MPa/s.

A Tabela 2.5 apresenta o quadro resumo dos dados relevantes para este estudo da resistência à compressão obtida pelos autores para os provetes que obtiveram rotura aceitável de acordo

com o tipo de betão utilizado. Neste artigo, e de acordo com a legislação já mencionada, a designação do betão é feita da seguinte forma:

“D35/20” – Representa o betão C35, cuja resistência à compressão mínima aos 28 dias de idade é de 35 MPa, e a dimensão do agregado presente na mistura é de 20 mm.

Tabela 2.5 - Valores de resistência à compressão obtidos para as várias dimensões de cubos de acordo com a designação do projeto (fabricante) que forneceu o betão (adaptado de [22])

Fabricante	Cubos		Resistência à Compressão (MPa)		
	Betão	nº de pares	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
25/WSD/92	D20/20	98	33.2	34.3	1.03
25/WSD/92	D35/20	88	55.2	56.6	1.03
CV/89/28	D35/20	48	52.4	55.1	1.05
SSA 389	D30/20	110	45.8	50.0	1.09
HY/89/04	D50/20	96	61.8	65.3	1.06
UA 11/91	D40/20	162	54.5	56.1	1.03
HY/93/01	D20/20	18	39.4	41.2	1.05
HY/93/01	D30/20	62	47.4	50.1	1.06
HY/93/01	D40/20	60	57.8	59.8	1.03

Concluiu-se que a relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> oscila entre 1.03 e 1.09 sendo o seu valor médio de 1.05, assim a resistência à compressão dos cubos de 100 mm é em média 5% maior que a dos cubos de 150 mm.

### 2.2.6 Seong-Tae, Yi Eun-Ik Yang e Joong-Cheol Choi (2005)

Em 2005, Seong-Tae Yi, Eun-Ik Yang, Joong-Cheol Choi [26], estudaram diversos parâmetros influentes como o efeito de escala, forma do molde e direção da carga aplicada na resistência à compressão.

Para tal, foram testadas quatro misturas diferentes de betão em provetes de três formas diferentes: cúbicos, cilíndricos e prismáticos. Para provetes cilíndricos foram utilizadas dimensões (diâmetro x altura) de Ø100x200 mm<sup>2</sup> e Ø150x300 mm<sup>2</sup>, provetes cúbicos de 50x50x50 mm<sup>3</sup>, 100x100x100 mm<sup>3</sup>, 150x150x150 mm<sup>3</sup> e 200x200x200 mm<sup>3</sup> e provetes prismáticos (base x altura) de 50x100 mm<sup>2</sup>, 100x200 mm<sup>2</sup>, 150x300 mm<sup>2</sup> e 200x400 mm<sup>2</sup>.

A carga foi aplicada por controlo de deslocamento com uma velocidade de 0.003 mm/s.

A Tabela 2.6 apresenta a composição das quatro misturas diferentes de betão utilizadas no ensaio experimental.



Tabela 2.6 - Composição das quatro misturas utilizadas (adaptado de [26])

Mistura	Quantidades (kg/m <sup>3</sup> )						SP(%)
	Água	Cimento	Areia	A. Grosso	Sílica de Fumo	A/C (%)	
1	185	276	900	962	—	67	—
2	180	360	837	970	—	50	—
3	175	500	755	948	—	35	1.0
4	165	531	692	942	59	28	2.5

A Tabela 2.7 apresenta o resumo dos dados relevantes para este estudo, bem como a relação de resistências entre os provetes cilíndricos com os provetes cúbicos e com provetes cúbicos entre si.

Tabela 2.7 - Valores de resistência à compressão (em MPa) obtidos e relações entre eles (adaptado de [26])

Mistura	Resistência à Compressão (MPa)				
	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
1	26.8	33.3	30.9	0.8	0.93
1	27.2	33.9	32.0	0.8	0.94
1	27.1	33.2	33.8	0.82	1.02
1	—	—	32.1	—	—
2	44.2	45.7	51.0	0.97	1.12
2	40.4	44.3	49.6	0.91	1.12
2	44.2	43.7	44.8	1.01	1.03
2	—	52.6	—	—	—
3	62.7	65.7	73.5	0.95	1.12
3	66.3	70.4	74.8	0.94	1.06
3	68.8	—	71.1	—	—
4	80.1	75.8	81.2	1.06	1.07
4	76.1	—	80.5	—	—
4	—	—	84.2	—	—

Analisando os dados podemos concluir que os betões ensaiados com resistência à compressão inferior a 40 MPa a relação de resistência entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos de 150 mm oscila entre 0.80 e 0.82 enquanto para betões com resistência à compressão superior a 40 MPa oscila entre 0.91 e 1.06.

No que diz respeito à relação de resistência entre provetes cúbicos de 100 mm e provetes cúbicos de 150 mm para betões com resistência à compressão inferior a 40 MPa oscila entre 0.93 e 1.02, enquanto que para betões com resistência à compressão superior a 40 MPa a mesma relação oscila entre 1.03 e 1.12.

A Figura 2.1 mostra a representação gráfica obtida pelos autores para a relação de resistência entre provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e cilindros de dimensão Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura):

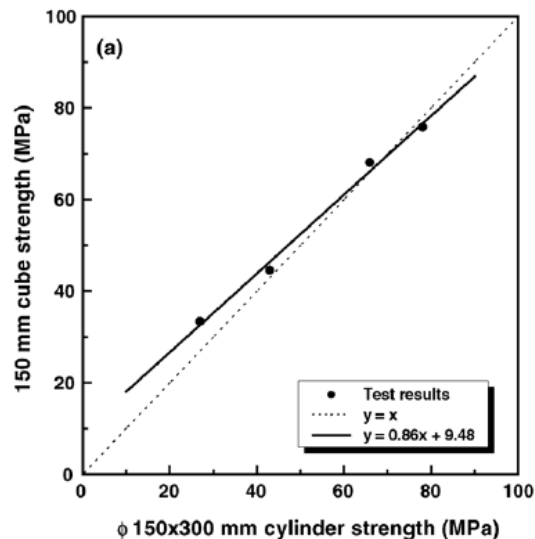


Figura 2.1 - Relação de resistências obtida entre provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e cilindros de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) (extraído de [26])

Os autores concluem que a resistência diminui à medida que a dimensão dos provetes aumenta e no que diz respeito às relações de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> e de Ø100x200 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) as relações de resistência estipuladas no CEB-FIP [9] devem ser alteradas.

### 2.2.7 A.S. Malaikah (2005)

Em 2005, Malaikah [27], referiu que Alsayed [28], em 1997 publicou um artigo sobre a influência do efeito de escala em betões de alta resistência onde concluiu que a relação de 0.80 que está estipulada no FIP-CEB 1990 [9] para betão normal também se aplica para betão de alta resistência.

Malaikah testou mais de 260 provetes feitos com 30 misturas (divididas em três grupos, de acordo com o tipo de agregado utilizado) de betão de alta resistência. Foram utilizados provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>, provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e de Ø100x200 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura), estas dimensões foram utilizadas devido a serem uma representação mais comumente utilizada para a construção local e indústria da construção do local onde foi feito o seu estudo (Arabia Saudita). Não é dada informação referente à velocidade de aplicação de carga utilizada.

As composições utilizadas nas misturas estão expostas nas Tabelas 2.8, 2.9 e 2.10 assim como a relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> de acordo com os três grupos em que foram divididos para a realização destes ensaios. Para todas as misturas, foi utilizado o cimento tipo I.

Tabela 2.8 - Composição do betão do grupo I e respetiva relação de resistência obtida entre provetes cilíndricos e cúbicos (adaptado de [27])

Ref. nº	Água	CEM I	Quantidades do grupo I (kg/m³)					SP (L/m³)	A/C	Relação $f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
			Sílica ativa	D20	D10	Areia	Areia de sílica			
I-1	145	495	49,5	1070	0	290	290	18.75	0.26	0.80
I-2	122.5	350	0	845	280	372,5	0	8,8	0.35	0.81

Tabela 2.9 - Composição do betão do grupo II e respetiva relação de resistência obtida entre provetes cilíndricos e cúbicos (adaptado de [27])

Ref. nº	Água	Quantidades do grupo II (kg/m³)						Relação	
		CEM I	Sílica ativa	D10	Areia	Areia de sílica	SP (L/m³)	A/C	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
II-1	145	495	0	1070	290	290	7.50	0.28	0.82
II-2	182	550	0	1050	271	271	5.50	0.33	0.87
II-3	182	495	55	1050	263	263	7.85	0.33	0.80
II-4	169	550	0	1050	287	287	7.35	0.31	0.79
II-5	169	495	55	1050	278	278	13.75	0.31	0.79
II-6	158	440	0	1050	302	302	10.00	0.29	0.88
II-7	158	495	55	1050	293	293	15.00	0.29	0.85
II-7R	158	495	55	1050	293	293	15.00	0.29	0.74
II-8	149	550	0	1050	314	314	13.37	0.27	0.88
II-9	149	495	55	1050	305	305	17.37	0.27	0.87
II-10	149	468	83	1050	301	301	20.12	0.27	0.87
II-11	138	550	0	1050	328	328	16.50	0.25	0.80
II-12	138	495	55	1050	319	319	19.75	0.25	0.81
II-13	138	468	83	1050	315	315	22.60	0.25	0.97
II-13R	138	468	83	1050	315	315	22.60	0.25	0.78

Tabela 2.10 - Composição do betão do grupo III e respetiva relação de resistência obtida entre provetes cilíndricos e cúbicos (adaptado de [27])

Ref. nº	Água	Quantidades do grupo III (kg/m³)							Relação
		CEM I	Sílica ativa	D10	Areia	Areia de sílica	SP (L/m³)	A/C*	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
III-3	121	550	0	1070	295	295	21.75	0.22	0.72
III-4	121	495	55	1070	295	295	30.00	0.22	0.81
III-5	132	550	0	1070	295	295	13.50	0.24	0.75
III-6	132	495	55	1070	295	295	21.25	0.24	0.83
III-7	143	550	0	1070	295	295	11.25	0.26	0.77
III-8	143	495	55	1070	295	295	18.63	0.26	0.73
III-9	154	550	0	1070	295	295	7.25	0.28	0.68
III-10	154	495	55	1070	295	295	13.95	0.28	0.68
III-11	165	550	0	1070	295	295	6.63	0.30	0.66
III-12	165	495	55	1070	295	295	12.00	0.30	0.70

\*incluindo o aditivo nos casos aplicáveis

O autor concluiu que o valor médio obtido para a relação de resistências entre os provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> é de

0.80 e que a composição de cada mistura afeta o valor desta relação. A Figura 2.2 mostra a regressão linear obtida que originou o valor médio dos mesmos.

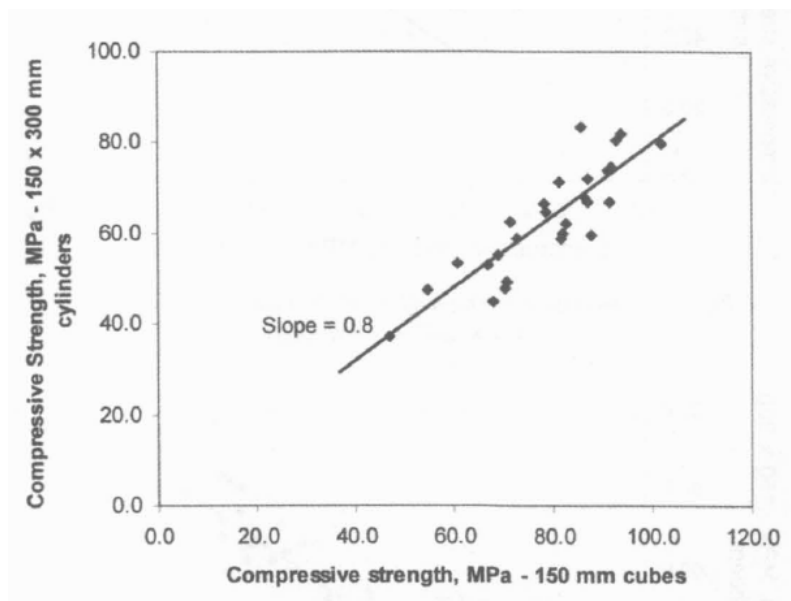


Figura 2.2 - Relação entre cilindros de Ø150x 300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e cubos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> (extraído de [27])

Neste estudo foi concluído que a relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> de betão de alta resistência é de 0.80.

### 2.2.8 NP EN 206-1 (2007)

A atual norma NP EN 206-1 [1], apresenta uma Tabela com os valores recomendados para a resistência mínima à compressão de várias classes de betão, desde as classes menos resistentes aos betões de alta resistência.

Os valores da Tabela 2.11 correspondem ao quadro 7 do NP EN 206-1[1], que apresentam as classes de resistência à compressão do betão obtidas em função do valor característico da sua resistência aos 28 dias obtida através de provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e de provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>. Foi feita uma coluna adicional ao lado dos dados da Tabela com a finalidade de mostrar a relação de resistência entre provetes cilíndricos e cúbicos que esta norma propõe.

Tabela 2.11 - Quadro 7 do NP EN 206-1 para relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos 150x150x150 mm<sup>3</sup> (adaptado de [1])

Classe de Resistência à Compressão	$f_{ck,cyl}$	$f_{ck,cub150}$	$f_{ck,cyl}/f_{ck,cub150}$
C8/10	8	10	0.80
C12/15	12	15	0.80
C16/20	16	20	0.80
C20/25	20	25	0.80
C25/30	25	30	0.83
C30/37	30	37	0.81
C35/45	35	45	0.78
C40/50	40	50	0.80
C45/55	45	55	0.82
C50/60	50	60	0.83
C55/67	55	67	0.82
C60/75	60	75	0.80
C70/85	70	85	0.82
C80/95	80	95	0.84
C90/105	90	105	0.86
C100/115	100	115	0.87

Os valores indicados para a relação de resistência entre provetes de forma cilíndrica de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes de forma cúbica de 150x150x150 mm<sup>3</sup> variam de 0.78 a 0.87.

### 2.2.9 M.V. Krishna Rao, P.Rathish Kumar, B. Srinivas (2010)

Em 2011, M.V. Krishna Rao, P. Rathish Kumare e B. Srinivas [29] realizaram um estudo experimental sobre betões reforçados com fibras de vidro, onde foram utilizados experimentalmente provetes de forma cúbica, cilíndrica e prismática de várias dimensões. O âmbito era estudar a influência da forma, altura, tipo de base e relação H/D (altura/diâmetro) dos provetes no valor da resistência à compressão.

Todos os provetes foram moldados em moldes de ferro submetidos a condições de cura húmida e ensaiados aos 7 dias e 28 dias de idade com uma velocidade constante de aplicação de carga dentro do intervalo de 0.2 MPa/s a 0.4 MPa/s.

As Tabelas 2.12 e 2.13 mostram de forma resumida os valores de resistência à compressão obtidos nas diferentes formas e dimensões de provetes, assim como a relação entre eles para betão de alta resistência não reforçado e para betão de alta resistência reforçado com fibras de vidro.

Tabela 2.12 - Valores de resistência à compressão obtidos, e respetivas relações em betão não reforçado (adaptado de [29])

Idade (dias)	Resistência à Compressão				
	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
7	15.29	20.02	18.20	0.76	0.91
28	25.48	33.40	30.20	0.76	0.90

Tabela 2.13 - Valores de resistência à compressão obtidos, e respectivas relações em betão reforçado com fibras de vidro (adaptado de [29])

Idade (dias)	Resistência à Compressão				
	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
7	16.81	21.20	18.40	0.79	0.87
28	27.60	34.20	31.80	0.81	0.93

Os autores tiraram as seguintes conclusões:

- Há um aumento no valor da resistência à compressão nos betões reforçados com fibras de vidro.
- Os cilindros com menor valor de diâmetro têm um valor de resistência à compressão mais alto do que os cilindros com maior valor de diâmetro. O mesmo é válido para os cubos com maior dimensão de aresta face aos cubos com uma dimensão de aresta menor, tanto para betões reforçados com fibras de vidro como para betões não reforçados.
- À medida que a relação H/D (altura/diâmetro) aumenta, o valor da resistência à compressão diminui.
- Os provetes cuja base era quadrada tiveram valores de resistência à compressão mais altos do que os provetes de base circular.
- A relação de resistência à compressão aos 28 dias de idade entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> é de 0.76 para betão simples e 0.81 para betão reforçado com fibras de vidro.
- A relação de resistência à compressão aos 28 dias de idade entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> é 0.90 para betão não reforçado e de 0.93 para betão reforçado com fibras de vidro.

### 2.2.10 Ali Ergun, Gökhan Kurklu (2012)

Em 2012, Ali Ergun e Gökhan Kurklu [30], publicaram um estudo sobre a relação entre a resistência à compressão de núcleos de betão e amostras moldadas. Para tal foram ensaiados diversos provetes cilíndricos de dimensões normalizadas como Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e de dimensões não normalizadas, e provetes cúbicos de apenas 150x150x150 mm<sup>3</sup> fazendo um total 1488 provetes testados.

Os provetes foram testados aos 28, 56 e 90 dias de idade e foram utilizados dois tipos de cura diferentes, cura húmida e cura em condições atmosféricas. Não foi dada informação sobre o valor da velocidade de aplicação de carga. Os resultados foram divididos em 8 series.

A Tabela 2.14 apresenta a correspondência utilizada entre as séries testadas e o tipo de betão:

Tabela 2.14 - Correspondência entre séries testadas e tipos de betão associados (adaptado de [30]).

Série	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
Betão	C16	C18	C22	C20	C25	C25	C14	C20

A Tabela 2.15 seguinte mostra os valores obtidos de resistência à compressão (em MPa) para provetes de dimensões normalizadas de diversas idades.

Tabela 2.15 - Resistência à compressão média (em MPa) obtida em provetes de dimensões normalizadas aos 28, 56 e 90 dias de idade (adaptado de [30])

		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
<b>Idade (dias)</b>		28	28	28	56	56	56	90	90
<b>Cura húmida</b>	$f_{cm,cub150}$	18.8	20.4	27.6	22.4	26.3	29.1	17.8	24.5
	$f_{cm,cyl}$	16.4	18.3	22.7	20.1	20.8	25.5	14.6	21.7
<b>Cura em c. atmosféricas</b>	$f_{cm,cub150}$	17.9	20.0	26.8	23.1	27.2	31.9	22.8	31.3
	$f_{cm,cyl}$	15.9	17.1	21.1	20.9	22.0	26.5	18.5	26.0

O Tabela 2.16 foi efetuada por forma a obter a relação de resistência de provetes cilíndricos com provetes cúbicos:

Tabela 2.16 - Relação de resistência à compressão entre cilindros e cubos para as várias idades e tipos de cura em função do tipo de betão (adaptado [30])

Relação $f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$			
Série	Idade	Cura húmida	Cura em c. atmosféricas
N1	28	0.87	0.89
N2	28	0.90	0.86
N3	28	0.82	0.79
N4	56	0.90	0.90
N5	56	0.79	0.81
N6	56	0.88	0.83
N7	90	0.82	0.81
N8	90	0.89	0.83

Analisando a Tabela podemos averiguar que as relações obtidas oscilam globalmente entre 0.79 e 0.90 para provetes tanto para um tipo de cura como para outro.

Os autores concluem que os provetes com 28 dias de idade que sofreram cura húmida apresentam uma resistência à compressão superior em 4-5% à dos provetes que sofreram cura em condições atmosféricas.

### 2.2.11 L. Maia, C. Caetano e M. Correia (2012)

Em 2012, L. Maia, C. Caetano e M. Correia [31] publicaram um estudo sobre a influência dos moldes nos ensaios de compressão do betão. Para tal recolheram 3 amostras de betão da região Autónoma da Madeira preenchendo no total 18 provetes cilíndricos, 60 provetes cúbicos

e 12 provetes prismáticos, todos respeitando as condições de cura. Os provetes cúbicos, com 150x150x150 mm<sup>3</sup> tanto são de moldes fabricados em ferro fundido como fabricados em poliuretano. Os provetes cilíndricos têm Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e os prismáticos (base quadrada x altura) têm 150x750 mm<sup>2</sup>.

A velocidade de aplicação da carga durante o ensaio experimental foi dentro do intervalo de  $0.6 \pm 0.2$  MPa/s para todos os provetes. A carga inicial aplicada foi 30% carga de rotura e foi posteriormente aumentada de forma contínua até que não fosse possível aplicar carga maior, com uma velocidade constante selecionada de  $\pm 10\%$ .

A Tabela 2.17 mostra os três tipos de amostras de betão utilizados, cuja diferença reside na classe e na dimensão do agregado máximo utilizado.

Tabela 2.17 - Tipos de amostras utilizadas (adaptado de [31])

<b>Amostra</b>	<b>Betão</b>	<b>Dmáx [mm]</b>
<b>1</b>	C20/25	22
<b>2</b>	C25/30	11
<b>3</b>	C30/37	11

Os valores de compressão obtidos experimentalmente podem ser visualizados na Tabela 2.18, cuja respetiva legenda é:

- “CP”, para provetes cúbicos moldados em moldes de poliuretano
- “CP120”, para provetes cúbicos moldados em moldes de poliuretano que foram retirados da água e colocados a secar à temperatura e humidade ambiente durante 120 minutos
- “CFF”, para provetes cúbicos moldados em moldes de ferro fundido que foram ensaiados à compressão quase imediatamente após retirar da água;
- “CFFR”, para provetes cúbicos moldados em moldes ferro fundido em que as faces de compressão destes provetes foram previamente retificadas
- “CC”, para provetes cilíndricos em que as faces de compressão foram previamente retificadas.

Tabela 2.18 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) obtidos para cada amostra de acordo com o tipo de molde (adaptado de [31])

<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>			
<b>Amostras</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
CP	24.6	36.9	45.6
CP120	25.5	38.6	44.9
CFF	26.9	40.8	47.3
CFFR	27.4	41.0	48.1
CC	24.1	36.6	44.0

A análise dos dados levou às seguintes conclusões da parte dos autores:



- A relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos é bem superior (para todos os tipos de conjuntos de provetes cúbicos – “CC”, “CP”, “CP120”, “CFF” e “CFFR”) à relação tradicionalmente assumida de 0.80.

- Estabelecendo a comparação direta entre os provetes cúbicos em moldes de poliuretano (visto serem os mais utilizados em Portugal – ‘CP’), verifica-se que a relação sobe para 0.98 para betão de classe C20/25, 0.99 para o betão C25/30 e 0.96 para o betão C30/37.

- O material com que o molde é fabricado tem influência no valor da resistência à compressão, assim como a altura dos provetes.

- A utilização de provetes cilíndricos conduz a valores de resistência à compressão quase iguais aos dos provetes cúbicos, ou seja, muito acima da relação prevista no Eurocódigo 2 [32], considerando assim a utilização de provetes cilíndricos neste âmbito mais económica.

## 2.2.12 R.N. Nibudey, P.B. Nagarnaik, D.K. Parbat, A. Pande (2013)

Em 2013, R.N. Nibudey et al. [2] publicaram um estudo de resistência à compressão com provetes feitos de betão convencional reforçado com fibras plásticas obtidas a partir de garrafas de plástico de resíduos (PET), o qual denominaram de PFRC. Todos os betões foram curados e testados aos 28 dias de idade, e para os testes utilizaram-se cubos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e cilindros de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura).

Foram testados dois tipos de betões normais endurecidos, os quais denominaram de M<sub>20</sub> e M<sub>30</sub>, e os mesmos tipos de betão em provetes diferentes reforçados com as fibras de plástico presentes em rácios diferentes. Não é dada informação sobre a velocidade de aplicação de carga.

A Tabela 2.19 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão com provetes cúbicos e cilindros com betão normal endurecido, assim como a relação de resistência entre os mesmos.

Tabela 2.19 - Valores de resistência à compressão obtidos em provetes cúbicos e cilíndricos em MPa de betão normal endurecido (0 %) (adaptado de [2])

Betão	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
M20	28.15	22.45	0.80
M30	41.19	33.2	0.81

A Tabela 2.20 mostra a relação de resistência à compressão obtida entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos com betões reforçado com fibras de plástico, PFRC, presentes em proporções diferentes, indicadas através do valor do rácio.

Tabela 2.20 - Relações obtidas para a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos em betões reforçados com PFRC com proporções diferentes (adaptado de [2])

Betão	Rácio de PFRC	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
M20	35	0.79
M20	50	0.79
M30	35	0.79
M30	50	0.81

A Tabela 2.21 mostra a relação de resistência à compressão obtida entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos agrupadas de acordo com a classe de resistência à compressão do betão utilizado.

Tabela 2.21 - Relação de resistência à compressão obtida em função do tipo de classe do betão ensaiado [adaptado de [2])

Classe de Betão	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
C25/30	0.83
C30/37	0.81
C35/45	0.78

Conclui-se que a relação de resistência à compressão obtida entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos de betão normal endurecido é igual à relação de resistência de provetes cilíndricos e provetes cúbicos de betão reforçado com PFRC.

### 2.2.13 N. Zabihi e Ö. Eren (2014)

Em 2014, N. Zabihi e Ö. Eren [33] estudaram a influência da dimensão e secção dos provetes de betão nos fatores de conversão da resistência à compressão. Foram testados provetes de forma cilíndrica de Ø100 x 200 mm<sup>2</sup> e Ø150 x 300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes de forma cubica de 100x100x100 mm<sup>3</sup>, 150x150x150 mm<sup>3</sup> e 200x200x200 mm<sup>3</sup>.

Foram utilizados dois tipos de cura (cura húmida e cura em condições atmosféricas) e duas composições de betão distintas, denominadas de “Nível I” e “Nível II”, apresentadas na Tabela 2.22.

Tabela 2.22 - Composição de betão de nível I e de nível II (adaptado de [33])

Nível	Quantidades (kg/m <sup>3</sup> )				
	Cimento	D10	D14	D20	A/C
I	225	167	251	501	0.56
II	170	212	318	630	0.35

Os provetes cúbicos foram ensaiados à compressão de acordo com a norma britânica BS EN: 12350-2:2009 [34] e os provetes cilíndricos de acordo com a norma americana ASTM C39/39 M [35]. Esta última está limitada a betão com uma densidade superior a 800 kg /m<sup>3</sup>.

De acordo com BS EN 12390-3[34], a velocidade de aplicação de carga para cubos é entre o intervalo de 0.2 MPa/s e 0.6 MPa/s e de acordo com a ASTM C39/39 M [35] a velocidade de aplicação de carga para cilindros é entre 0.05 MPa/s a 0.25 MPa/s.

A Tabela 2.23 apresenta a relação de resistência entre provetes de diferentes formas e dimensões para betões de Nível I.

Tabela 2.23 - Relações de resistência à compressão obtidas em provetes cúbicos e cilindros para betões de Nível I em função do tipo de cura (adaptado de [33])

<b>Cura</b>	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
<b>Água</b>	0.88	1.16
<b>Ar</b>	0.82	1.21

Na Tabela 2.24 apresenta-se as relações de resistência obtidas para betões de nível II.

Tabela 2.24 - Relações de resistência à compressão obtidas em provetes cúbicos e cilindros para betões de Nível II em função do tipo de cura (adaptado de [33])

<b>Cura</b>	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
<b>Água</b>	0.89	1.39
<b>Ar</b>	0.85	1.26

Os autores concluíram que os provetes curados em água apresentam uma maior resistência do que os provetes curados ao ar, assim como qualquer fator que influencie a característica da resistência à compressão também irá influenciar os fatores de conversão.

### 2.2.14 Hemraj R. Kumavat, Vikram J. Patel (2014)

Em 2014, Hemraj R. Kumavat e Vikram J. Patel [3] publicaram um estudo sobre os fatores que influenciam a relação da resistência à compressão entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos de betão para as dimensões normalizadas de provetes.

Foram testados à compressão provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> aos 7 e 28 dias de idade, foram utilizadas quatro misturas distintas de betão, com uma relação A/C constante de 0.45. A Tabela 2.25 apresenta os resultados obtidos pelos provetes juntamente com a respetiva relação de resistência entre eles.

Tabela 2.25 - Composições da mistura utilizadas e respetiva relação de resistência entre provetes cilíndricos e cúbicos (adaptado de [3])

Idade (dias)	D <sub>máx</sub> (mm)	Mistura	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
7	20	A	0.69
		B	0.83
		C	0.90
		D	0.93
7	10	A	0.79
		B	0.79
		C	0.96
		D	0.99
28	20	A	0.92
		B	0.94
		C	0.96
		D	0.97
28	10	A	0.93
		B	0.95
		C	0.96
		D	0.97

As seguintes conclusões foram tiradas pelos autores:

- A relação de resistência à compressão varia de acordo com a classe de resistência dos betões, embora para betões de alta resistência a relação seja bastante próxima de 1.00. A mesma relação de varia de acordo com vários fatores, como a relação A/C do betão, quantidade de cimento, dimensão máxima do agregado e idade do betão.

- A legislação sugere que a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos é de 0.80, mas que de acordo com os resultados obtidos essa relação não é uniforme, não se podendo estabelecer um valor único.

### 2.2.15 Mohammed Karem Abd, Zuhair Dhaher Habeeb (2014)

Em 2014, Mohammed Karem Abd e Zuhair Dhaher Habeeb [36], publicaram um estudo sobre a influência da dimensão e secção dos provetes na resistência à compressão do betão.

Foram utilizados provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e de 150x150x150 mm<sup>3</sup>, recorrendo a quatro tipos de misturas: uma para betão normal (NC), outra para betão de alta resistência (HSC) e as outras duas de betão auto compactável (HSCC e CSCC).

Os provetes foram submetidos a cura húmida e testados aos 28 dias de idade. Não é dada informação sobre a velocidade de aplicação de carga utilizada.

A Tabela 2.26 representa os resultados de resistência à compressão obtidos para os diferentes tipos de betão.

Tabela 2.26 - Valores de resistência à compressão (em MPa) de provetes de dimensões normalizadas e respetiva relação dos mesmos (adaptado de [36])

Betão	Resistência à Compressão (MPa)				
	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
NC	28.0	26.2	20.6	0.79	1.07
HSC	46.3	44.7	35.4	0.79	1.04
HSCC	47.3	43.6	36.5	0.84	1.08
CSCC	60.3	54.7	44.3	0.81	1.10

Os autores tiraram as seguintes conclusões:

- A influência da forma do provete decresce à medida que a resistência à compressão aumenta.
- A relação de resistência entre cilindros e cubos com dimensões menores que a normalizada é maior para provetes de maiores dimensões.
- Os fatores de correção para a relação de resistência entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos de betão de tipo auto-compactável aproxima-se de 1.00.
- Para o betão de tipo auto-compactável recomenda-se o uso de qualquer forma e dimensão de provete.

### 2.2.16 Saurav, Ashok Kumar Gupta (2014)

Emn 2014, Saurav e Ashok Kumar Gupta [37], publicaram um artigo sobre a relação da resistência à compressão entre cubos e cilindros de betão normal e de betão com escória ultrafina *Alccofine*.

As escórias ultra finas são materiais bastante importantes pois contribuem para o aumento da durabilidade e trabalhabilidade, maior período de vida útil, melhor produção para o ambiente, melhor qualidade e menor permeabilidade.

Foram utilizados provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> feitos com betão de alta resistência (M50) com uma substituição parcial do cimento por escória ultrafina *Alccofine*. Os provetes foram ensaiados aos 3, 7 e 28 dias de idade. Não foi dada informação sobre a velocidade de aplicação de carga.

Para uma melhor caracterização da evolução da performance do betão com este tipo de adição foram produzidas misturas com diferentes percentagens de *Alccofine* e os seus provetes cúbicos classificados da seguinte forma: C0, C3, C5, C7, C10, C13 e C18 onde o valor numérico representa a percentagem de *alccofine* utilizada. Os provetes cilíndricos foram classificados de igual modo, mas com a letra S, ou seja, S0, S3, S5, S7, S10, S13, S15 e S18.

A Tabela 2.27 apresenta as relações de resistência à compressão de provetes cilíndricos com provetes cúbicos obtidas através dos resultados:

Tabela 2.27 - Relação de resistência à compressão (em MPa) de provetes cilíndricos com provetes cúbicos aos 3, 7 e 28 dias de idade (adaptado de [37])

$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$			
Idade	3 dias	7 dias	28 dias
S0/C0	0.68	0.85	0.97
S3/C3	0.71	0.88	0.90
S5/C5	0.81	0.90	0.96
S10/C10	0.90	0.91	0.94
S13/C13	0.91	0.93	0.95
S15/C15	0.92	0.94	0.96

Analisando a Tabela 2.27 podemos concluir que a relação de resistência entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos oscila entre 0.85 e 0.94 para betões com 7 dias de idade e 0.90 e 0.97 para betões com 28 dias de idade, estando mesmo muito próximas de 1.00.

Através da análise dos resultados obtidos, os autores concluíram que:

- O endurecimento do betão é incrementado com adição de escória ultrafina *Alccofine*.
- A resistência dos cilindros aumenta após adição de *Alccofine* mas é sempre inferior à dos provetes cúbicos.
- A percentagem de adição de *Alccofine* que mais aumenta as propriedades de endurecimento do betão é a de 13%.

### 2.2.17 Rajiv Banarjee, Md. Abid Alam, Zeeshan Ahmad, (2015)

Em 2015, Rajiv Banarjee, Md. Abi d Alam e Zeeshan Ahmad [38], estudaram a relação de resistência à compressão entre provetes cúbicos de betão de diversos tamanhos. Foram testados provetes cúbicos de betão de quatro dimensões de aresta: 75 mm, 100 mm, 125 mm e 150 mm.

Foram utilizadas quatro misturas de betão diferentes classificadas como M20, M25, M30 e M35, cuja composição está indicada na Tabela 2.28. Os ensaios de resistência foram feitos de acordo com a norma IS516: 1959 [39], que estipula que a velocidade de aplicação da carga deverá ser aumentada continuamente a uma taxa de 140 kg/cm<sup>2</sup>/min até à rotura do provete.

Tabela 2.28 - Composição das misturas utilizadas (adaptado de [38])

Mistura	Betão	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	A/C	D (kg/m <sup>3</sup> )
M-1	M20	346.00	197.16	0.57	1150.00
M-2	M25	394.32	197.16	0.50	1150.00
M-3	M30	439.13	197.16	0.45	1143.74
M-4	M35	492.90	197.16	0.40	1129.85

A Tabela 2.29 mostra o resumo dos resultados obtidos relevantes para a resistência à compressão do betão:

Tabela 2.29 - Resistência à compressão (em MPa) de provetes cúbicos de betão aos 7 e 28 dias de idade (adaptado de [38])

Mistura	Betão	Idade (dias)	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
M-1	M20	7	1.02
		28	1.01
M-2	M25	7	1.02
		28	1.01
M-3	M30	7	1.02
		28	1.03
M-4	M35	7	1.01
		28	1.02

Analisando a Tabela 2.29 concluímos que para o betão M20 e M25 a relação de provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> com provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> é maior aos 7 dias do que aos 28 dias de idade. Para os betões M30 e M35 a relação maior é a apresentada aos 28 dias. Os valores oscilam entre 1.01 e 1.02 para os 7 dias de idade e 1.01 e 1.03 para os 28 dias de idade.

### 2.2.18 Ali Jihad Hamad, (2015)

Em 2015, Ali jihad Hamad [40], estudou o efeito da dimensão e forma dos provetes no valor da resistência à compressão de betão HPLWFC (betão leve de alto desempenho reforçado com fibras). Foram utilizados provetes cúbicos de 50x50x50 mm<sup>3</sup>, 100x100x100 mm<sup>3</sup> e 150x150x150 mm<sup>3</sup>, e cilíndricos de Ø100x200 mm<sup>2</sup> e de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura). Foi utilizada apenas uma mistura de betão, em que a única variação entre os provetes foi a quantidade de fibra introduzida para ação de reforço (contabilizada em percentagem).

Os cubos foram testados de acordo com a norma BS EN 12390-3 [41] e os cilindros de acordo com a norma ASTM C 39 [42]. Todos os provetes foram submetidos a condições de cura em água e os ensaios foram realizados às idades de 7 e 28 dias. A velocidade de aplicação de carga utilizada foi de 0,4 MPa/s numa prensa com 2000 kN de capacidade de carga.

A tabela 2.30 apresenta a composição da mistura utilizada.

Tabela 2.30 - Composição da mistura (adaptado de [40])

Composição da mistura				
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Vazios (%)	A/C (%)
465	228	1046	23	49

As tabelas 2.31 e 2.32 apresentam os valores obtidos de resistência à compressão (em MPa), assim como as relações de resistência entre os tipos de provetes para as idades de 7 e 28 dias de acordo com a percentagem de fibras inserida para ação de reforço.

Tabela 2.31 - Resultados obtidos de resistência à compressão (em MPa) e respectivas relações de resistência entre provetes aos 7 dias de idade (adaptado de [40])

Resultados	7 dias				
% de Fibra	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
0.00	14.2	11.4	10.1	0.89	1.25
0.06	16.0	13.5	11.8	0.87	1.19
0.20	18.0	16.2	14.3	0.88	1.11
0.40	21.0	19.4	17.6	0.91	1.08

Tabela 2.32 - Resultados obtidos de resistência à compressão (em MPa) e respectivas relações de resistência entre provetes aos 28 dias de idade (adaptado de [40])

Resultados	28 dias				
% de Fibra	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
0.00	19.0	15.8	13.5	0.85	1.20
0.06	20.5	17.4	15.2	0.87	1.18
0.20	24.4	22.0	19.5	0.89	1.11
0.40	27.1	26.2	23.4	0.89	1.03

O autor concluiu que:

- O valor da resistência à compressão aumenta conforme a percentagem de fibra inserida para reforço.
- Provetes de dimensão mais pequena, independentemente da forma, conduzem a maiores valores de resistência à compressão.
- A média da relação de resistência obtida entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> foi de 0.88.
- A média da relação de resistência obtida entre provetes cúbicos de Ø100x100x100 mm<sup>3</sup> e de 150x150x150 mm<sup>3</sup> foi de 1.11.

## 2.3 Compilação dos trabalhos anteriores

A Tabela 2.33 apresenta um resumo das relações de resistência obtidas pelos autores referidas anteriormente, apresentam-se as relações de resistência à compressão de provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> de aresta com provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> de aresta, e de provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) com provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> de aresta.



Tabela 2.33 - Resumo das relações de resistência obtidas pelos autores referidos anteriormente.

<b>Autores</b>	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
<b>Neville</b>	0.76 a 0.85	1.04
<b>FIP-CEB</b>	0.80 a 0.87	—
<b>D. Elwell e G. Fu</b>	0.65 a 0.90	—
<b>Gonnerman</b>	0.85 a 0.88	—
<b>Gyengo</b>	0.65 a 0.84	—
<b>Evans</b>	0.76 a 0.96	—
<b>Cormack</b>	0.87	—
<b>Sigvaldason</b>	0.76 a 0.84	—
<b>Plowman, Smith, e Sheriff</b>	0.74 para cura em água 0.64 para cura ao ar	— —
<b>Raju e Basavarajaiah</b>	0.61	—
<b>Lysle and Johansen</b>	0.86	—
<b>Lasisi, Osunade e Olorunnitwo</b>	0.55 a 0.86	—
<b>Imam, Vandewalle, Mortelmans</b>	0.95	1.05
<b>W.C. Leung e K.S. Ho</b>	—	1.05
<b>Seong-Tae Yi, Yang, Choi</b>	0.80 na 0.82 para betões com $f_c < 40$ MPa 0.91 a 1.06 para betões com $f_c > 40$ MPa	0.93 a 1.02 para betões com $f_c < 40$ MPa 1.03 e 1.12 para betões com $f_c > 40$ MPa
<b>Malaikah</b>	0.66 e 0.97	—
<b>Alsayed</b>	0.80	—
<b>NP EN 206-1</b>	0.80 a 0.87	—
<b>Krishna Rao, Kumar, Srinivas</b>	0.76 para betão não reforçado 0.81 para betão reforçado com fibras de vidro	0.90 para betão não reforçado 0.93 para betão reforçado com fibras de vidro
<b>Ali Ergun, Gökhan Kurklu</b>	0.79 a 0.90 superior a 0.80 para a maioria dos casos	— —
<b>Maia L., Caetano C. e Correia M</b>	0.96 para C30/37 0.98 para C20/25 0.99 para C25/30	— — —
<b>Nibudey, Nagarnaik, Parbat, Pande</b>	0.80 a 0.81 para betão normal 0.79 a 0.81 para betão com PFRC	— —
<b>N. Zabihi e Ö. Eren</b>	0.88 a 0.89 para cura com água 0.82 a 0.85 para cura ao ar	1.16 a 1.39 para cura com água 1.21 a 1.26 para cura ao ar
<b>Hemraj, Kumavat, Vikram Mohammed Abd e Zuhair Habeeb</b>	0.67 a 1.0 0.79 a 0.84	— 1.04 a 1.10
<b>Saurav e Ashok Kumar Gupta</b>	0.85 e 0.94	—
<b>Rajiv Banarjee, Alam, Ahmad</b>	—	1.01 a 1.02
<b>Ali Jihad Hamad</b>	0.88	1.11

Concluimos assim que as relações de resistência obtidas pelos autores referidos anteriormente oscilam entre os 0.55 e 0.96 para a relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e de 0.90 a 1.39 para a relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>. Esta variação de valores pode ser explicada devido a diferentes condições de ensaio utilizadas e diferentes composições de misturas de betão.



## 3. Resistência à Compressão do Betão

### 3.1 Definição

A resistência à compressão é uma das características mecânicas mais importantes do betão. O valor da tensão de rotura do betão à compressão é determinado através de ensaios experimentais que podem ser realizados em qualquer idade, no entanto para caracterizar o betão convencionou-se a idade de 28 dias de idade utilizando provetes de forma cúbica ou cilíndrica, de dimensões normalizadas de acordo com a norma NP EN 12390-3[6].

Os procedimentos de cura e ensaio também se encontram normalizados para que haja pouca influência de fatores externos ou internos na determinação deste valor e o mesmo ser medido em provetes que sejam próximos em valor da resistência do betão em elementos estruturais.

A resistência à compressão do betão é expressa em termos do valor característico da tensão de rotura do betão à compressão,  $f_{ck}$ , definido como o valor que apresenta 95% de probabilidade de ser excedido.

Os provetes de forma cúbica apresentam potencialmente um maior valor de resistência em relação aos provetes cilíndricos devido ao efeito de cintagem. Este efeito resulta do atrito entre os pratos da máquina e as faces do provete em contacto com eles, o que impede que a expansão do provete se faça livremente, desenvolvendo-se o equivalente a forças laterais de compressão que fazem com que a rotura exija uma carga mais elevada, o que não aconteceria se o provete estivesse sujeito a um estado de tensão uniaxial. Os provetes cilíndricos por sua vez ficam submetidos a um estado de tensão que se aproxima mais, na zona central, de um estado uniaxial de compressão [44].

### 3.2 Classificação do betão

O betão é classificado de acordo com a sua resistência à compressão, conforme ilustrado na Tabela 3.1. O primeiro número a seguir à letra C indica o valor característico da resistência à compressão referida a provetes cilíndricos, enquanto o segundo indica o mesmo valor referido a provetes cúbicos.

Tabela 3.1 - Classificação de Resistência à Compressão do Betão (extraído de [1])

<b>Classe</b>	<b><math>f_{ck,cyl}</math></b>	<b><math>f_{ck,cub150}</math></b>
<b>C8/10</b>	8	10
<b>C12/15</b>	12	15
<b>C16/20</b>	16	20
<b>C20/25</b>	20	25
<b>C25/30</b>	25	30
<b>C30/37</b>	30	37
<b>C35/45</b>	35	45
<b>C40/50</b>	40	50
<b>C45/55</b>	45	55
<b>C50/60</b>	50	60
<b>C55/67</b>	55	67
<b>C60/75</b>	60	75
<b>C70/85</b>	70	85
<b>C80/95</b>	80	95
<b>C90/105</b>	90	105
<b>C100/115</b>	100	115

A Tabela 3.2 apresenta as classes de resistência aplicadas ao betão leve precedidas pelo símbolo LC (“light concrete”).

Tabela 3.2 - Classificação de Resistência à Compressão do betão leve (extraído de [1])

<b>Classe</b>	<b><math>f_{ck,cyl}</math></b>	<b><math>f_{ck,cub150}</math></b>
<b>LC 8/9</b>	8	9
<b>LC 12/13</b>	12	13
<b>LC 16/18</b>	16	18
<b>LC 20/22</b>	20	22
<b>LC 25/28</b>	25	28
<b>LC 30/33</b>	30	33
<b>LC 35/38</b>	35	38
<b>LC 40/44</b>	40	44
<b>LC 45/50</b>	45	50
<b>LC 50/55</b>	50	55
<b>LC 55/60</b>	55	60
<b>LC 60/66</b>	60	66
<b>LC 70/77</b>	70	77
<b>LC 80/88</b>	80	88

### 3.3 Preparação das superfícies

A preparação de provetes é o nome dado ao processo de alisamento dos topos dos provetes cúbicos e cilíndricos de betão como forma de preparação para certos ensaios mecânicos, como o ensaio de resistência à compressão.

Este processo tem como objetivos que os topos dos provetes se apresentem lisos e paralelos para uma distribuição uniforme de tensões no aparelho de ensaio reduzindo assim as seguintes condicionantes [45]:

- Falta de paralelismo entre os pratos da prensa
- Topos livres de irregularidades
- Desvios do eixo do provete em relação à direção da movimentação dos pratos
- Falta de ortogonalidade entre superfície dos topos e geratriz dos provetes
- Atrito entre pratos e provetes.

Existem diferentes métodos de preparação, tais como:

- Retificação
- Capeamento usando cimento com aluminato de cálcio
- Capeamento usando o método da mistura com enxofre
- Capeamento usando o método da caixa de areia.

Os procedimentos e respectivas restrições dos diferentes métodos de preparação dos provetes estão estipulados na norma NP EN 12390-3[6].

### **3.4 Fatores que influenciam a resistência à compressão**

O betão é definido como um material formado pela mistura de cimento, agregados grossos e finos, água, e pode ter ou não a incorporação de adjuvantes e/ou adições que desenvolvem as suas propriedades por hidratação do cimento [1]

Os constituintes do betão tomam especial importância no que diz respeito à sua resistência mecânica, pois influenciam diretamente o seu valor, tornando-se assim fatores internos de extrema importância e com regulamentação própria a obedecer.

Os fatores que influenciam o valor da resistência à compressão são:

- Porosidade e índice de Vazios
- Relação A/C
- Tipo de cimento
- Tipo de aditivos
- Quantidade de água de amassadura
- Granulometria de agregados
- Quantidade de agregados

- Adjuvantes
- Idade
- Vibração
- Moldes de fabrico
- Cura
- Causas acidentais

### 3.4.1 Porosidade e Índice de Vazios

Porosidade e Índice de vazios são grandezas volumétricas diretamente relacionadas entre si. A porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de vazios dum corpo e o seu volume total, e é frequentemente expressa em percentagem. O índice de vazios é definido como a relação entre o volume de vazios dum corpo e o volume das partículas sólidas do mesmo [46].

Quanto maior o volume de vazios no corpo, maior a sua porosidade e sensibilidade à degradação, pois o material absorve uma maior quantidade de água, absorvendo também tudo aquilo que nela se encontra dissolvido. O índice de vazios no betão varia de acordo com as variações dos materiais constituintes, a granulometria da mistura, as condições de aplicação, a compactação, o ambiente e as condições do local [45].

Sendo a resistência mecânica dependente do volume de vazios, podemos afirmar que quanto maior o índice de vazios do material (ou porosidade do mesmo), menor será o valor da sua resistência mecânica [47] constituindo assim uma relação inversa entre a resistência e o índice de vazios (ou porosidade, uma vez que são propriedades relacionadas uma com a outra).

A Figura 3.1 representa a relação entre a porosidade e a resistência à compressão:

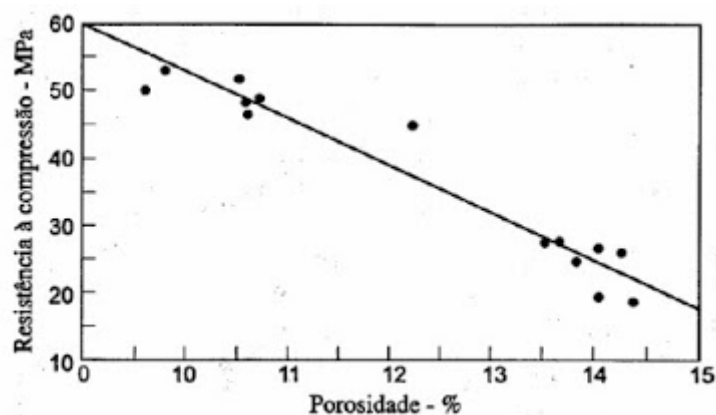


Figura 3.1 - Relação entre a porosidade e a resistência à compressão (extraído de [62])

Analisando a figura anterior concluímos que à medida que a porosidade aumenta a resistência à compressão diminui.

### 3.4.2 Relação A/C

A relação “A/C” representa a relação água/cimento que é a quantidade de água em proporção ao cimento presente na mistura. É das propriedades mais importantes do betão pois tem influência em diversos dos seus parâmetros como: a trabalhabilidade, durabilidade, permeabilidade, porosidade e resistência à compressão.

Um aumento na relação A/C irá provocar uma maior porosidade e consequentemente um menor valor de resistência à compressão como visto na Figura 3.1.

Neste âmbito, Abrams [48] em 1918 realizou vários ensaios experimentais para medir esta influência e concluiu que à medida que a relação A/C aumenta, a resistência à compressão diminui como pode ser visto na Figura 3.2:

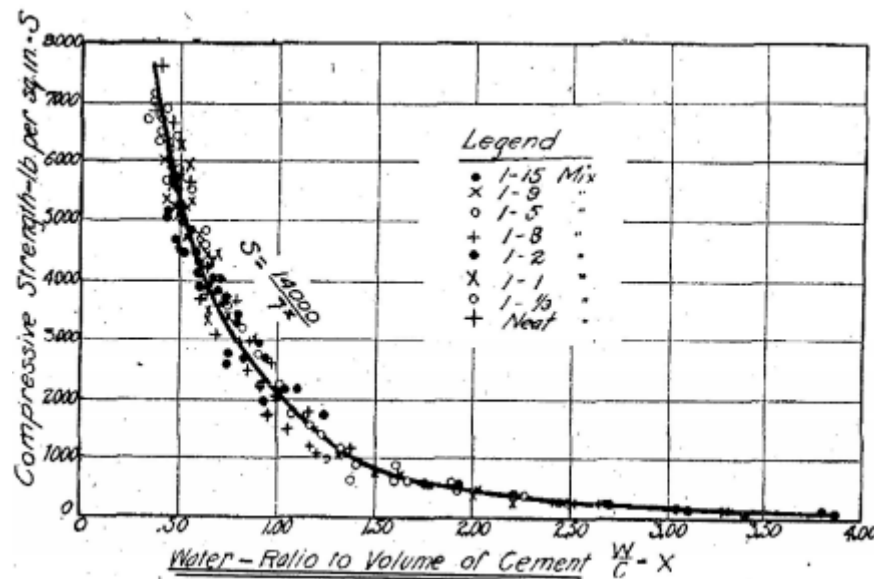


Figura 3.2 - Relação entre a resistência do betão e a relação A/C e volume (extraído de [48])

Estabeleceu-se então a Lei de Abrams com a seguinte expressão:

$$R = \frac{a}{b \left(\frac{A}{C}\right)} \quad (1)$$

Sendo:

R – Resistência à compressão

**a** e **b** - Constantes empíricas.

$\frac{A}{C}$

- Relação água/cimento,

Esta lei é válida desde que o betão seja devidamente compactado, pois para relações A/C abaixo do estritamente necessário (para a hidratação do cimento) não irão aumentar a resistência à compressão devido à mistura não ser trabalhável o suficiente para permitir uma consolidação completa [48].

Neville [23], [49] obteve a relação ilustrada na Figura 3.3 de resistência à compressão com a relação A/C para betões com 7 dias de idade:

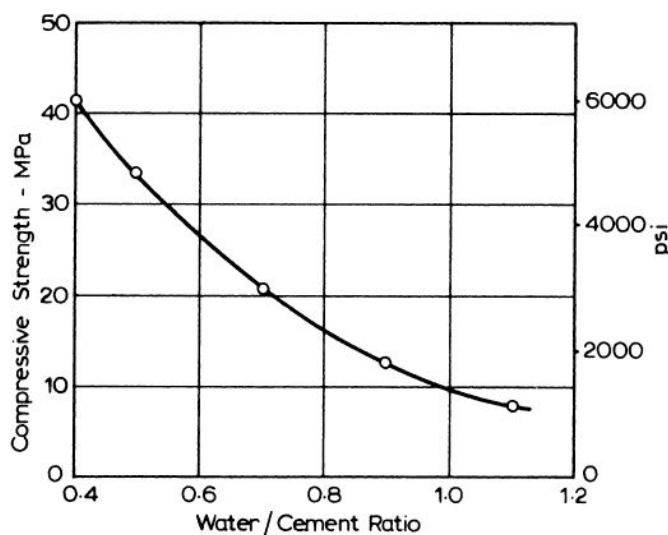


Figura 3.3 - Relação entre resistência e relação A/C obtida para betão de 7 dias de idade feito com cimento Portland de endurecimento rápido (extraído de [5], [6], [44])

A relação obtida tem a forma aproximada de uma hipérbole, tal como a relação mais antiga obtida por Abrams [48]. Neville [23], [49] afirma que esta relação aplica-se para betões feitos com qualquer tipo de agregado e para qualquer idade.

Quanto maior o valor da relação A/C menos resistente se torna a mistura, isto pelo facto da água adicionada além da estritamente necessária para a hidratação do cimento, irá incrementar a porosidade capilar reduzindo assim a compacidade do betão e, por consequente, a sua resistência mecânica.

### 3.4.3 Tipo de Cimento

O cimento, principal constituinte do betão, é um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece por meio das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, conserva a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água [43].



A sua matéria-prima é obtida a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário com marga ou argila, substâncias muito ricas em sílica, alumina ou ferro. No seu processo de cozedura ocorrem reações químicas, formando-se novos compostos que, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços designados por clínquer. Após o arrefecimento, o clínquer é moído juntamente com adjuvantes, para facilitar a moagem, e gesso para regular o tempo de presa. Nesta fase, podem ser juntadas à mistura adições (pozolanas, cinzas volantes, escórias de alto forno, etc.) para lhe modificar as propriedades, criando assim vários tipos de cimento [43].

Quando o cimento é misturado com água ocorrem reações de hidratação que formam compostos estáveis que cristalizam com forma fibrosa interligando-se, conferindo ao conjunto uma elevada resistência.

As propriedades do cimento, nomeadamente o seu comportamento mecânico, dependem da sua composição química e da finura obtida na moagem.

Componentes principais do cimento:

- Silicato tricálcico  $3CaO.SiO_2$  (20 a 65%)
- Silicato bicálcico  $2CaO.SiO_2$  (10 a 55%)
- Aluminato tricálcico  $2CaO.Al_2O_3$  (0 a 15%)
- Alumino ferrato tetra cálcico  $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$  (5 a 15%)

A Figura 3.4 apresenta o desenvolvimento com o tempo, da tensão de rotura de pastas de cada um dos componentes principais do cimento Portland preparados artificialmente:

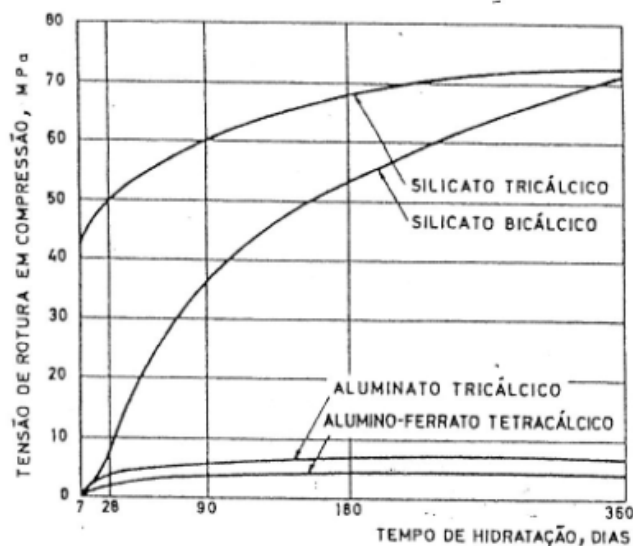


Figura 3.4 - Variação com o tempo, da resistência à compressão de pastas dos principais componentes puros do cimento Portland (extraído de [52]).

Analisando o gráfico, o silicato tricálcico é o que reage mais rapidamente com a água, atingindo as maiores resistências. A reação do silicato bicálcico é muito mais lenta embora, a

longo prazo, este composto terá tensões de rotura da mesma ordem de grandeza do silicato tricálcico. Este facto deve-se à estrutura muito mais compacta do primeiro, pois a do silicato tricálcico é menos perfeita e menos densa, com bastantes vazios. O aluminato tricálcico, assim como o aluminato ferrato tem um papel menos relevante no desenvolvimento das resistências, embora também contribua [47].

De uma forma geral pode dizer-se que a dosagem de ligante possui uma influência direta na resistência à compressão do betão, assim como na sua trabalhabilidade. Os betões pobres em cimento tornam as misturas ásperas, com tendência a segregar, dando acabamento superficial difícil. Os betões muito ricos em cimento apresentam-se excessivamente coesivos e aderentes, sendo mais difícil a colocação em obra. O calor de hidratação possui uma grande influência, podendo originar problemas de excessiva retração com riscos de fissuração [44].

A Figura 3.5 ilustra a relação entre a dosagem de cimento e a percentagem da resistência obtida de compressão e de flexão, para betões fabricados com cimento da mesma amostra com trabalhabilidade, idade e cura iguais.

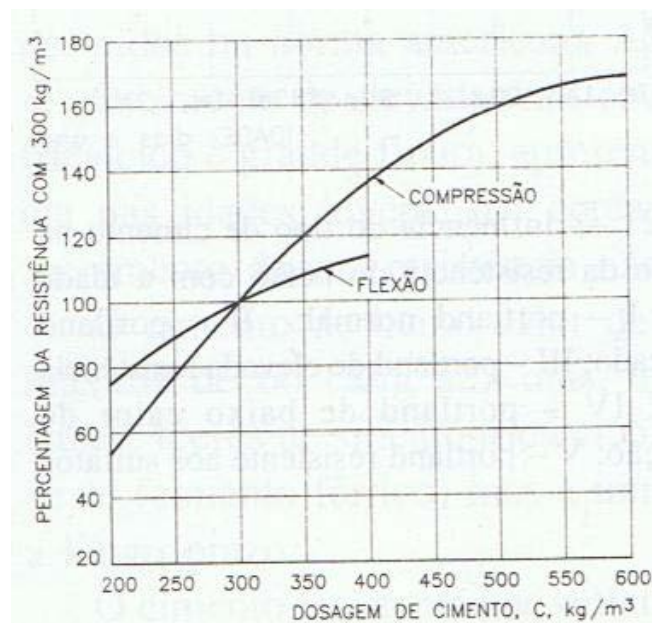


Figura 3.5 - Influência da dosagem de cimento nas percentagens resistências à compressão e à flexão (extraído de [52])

Conclui-se da figura anterior que quanto maior a dosagem de cimento, maior o valor de resistência à compressão.

### 3.4.4 Aditivos

Um aditivo é um material inorgânico finamente dividido de finura menor ou igual ao do cimento e que pode ser adicionado ao betão na amassadura, com a finalidade de melhorar certas

propriedades ou para adquirir propriedades especiais. Existem adições de tipo I (adições quase inertes) e adições de tipo II (adições pozolânicas ou hidráulicas latentes) [1].

As adições do tipo II apresentam em geral, menores resistências iniciais, mas a longo prazo exibem: maiores resistências mecânicas derivado ao maior estado de compacidade e maior teor em silicatos de cálcio [43]. Adições com filler calcário, propriedades pozolânicas ou com escórias de alto forno também afetam o valor da resistência à compressão.

### **3.4.5 Água de Amassadura**

A água de amassadura desempenha dois papéis importantes na massa fresca e na fase de endurecimento do betão. No betão fresco, a água confere à massa a trabalhabilidade adequada para permitir uma boa colocação e compactação. Na fase de endurecimento a água participa nas reações de hidratação do cimento que conferem a resistência necessária ao betão [43].

A água utilizada deve ser incolor ou ligeiramente amarelada, sem óleos ou gorduras e sem matérias orgânicas. A presença de matérias orgânicas na água afeta o betão dos seguintes modos:

- Percentagens de óleos minerais superiores a 2% da massa de cimento provocam redução das tensões de rotura;
- Ácidos húmicos retardam a presa, não tendo efeitos prejudiciais a longo prazo;
- Matérias orgânicas de outra natureza (como algas) podem conduzir a grandes reduções das tensões de rotura, provocadas pela introdução de ar no betão, pelas dimensões coloidais dos elementos (redução da aderência do cimento ao agregado ou da aderência entre os cristais de cimento hidratado), por eventuais secreções provenientes dos elementos orgânicos (diminuição das propriedades ligantes).
- Hidratos de carbono (geralmente glucose ou sacarose) têm influência na presa e no endurecimento: pequenas quantidades (até 0,1% da massa do cimento) retardam a presa, mas aumentam as tensões de rotura a longo prazo; quantidades superiores aceleram a presa mas reduzem as tensões de rotura.[50].

De acordo com a secção anterior 3.4.2 não se pode colocar dosagens de água insuficientes pois será impossível um betão muito seco atingir uma compacidade satisfatória afetando negativamente a resistência, assim como colocar dosagens de água elevadas contribui para uma grande diminuição da resistência devido à evaporação da água que cria poros capilares no betão, sendo que a porosidade é inversamente proporcional à resistência.

Assim a quantidade de água a utilizar deverá ser a indispensável para se obter a trabalhabilidade pretendida.

### 3.4.6 Agregados

Os agregados podem ser classificados de diversas formas.

- Quanto à sua natureza (naturais, artificiais ou reciclados de materiais usados previamente na construção).
- Quanto à massa volúmica,  $\gamma$  (agregados leves com  $\gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$ , agregados normais com  $2000 \leq \gamma \leq 3000 \text{ kg/m}^3$  ou agregados muito densos com  $\gamma > 3000 \text{ kg/m}^3$ ).
- Quanto à sua origem (sedimentares, metamórficos ou ígneos).

Os materiais agregados devem ser escolhidos de forma judiciosa para serem corretamente proporcionados e misturados em quantidades previamente estabelecidas, de modo a obter um betão com as características especificadas.

Para tal devem ser controladas algumas características dos agregados tais como a granulometria, dimensão máxima, forma e durabilidade.

A granulometria dos agregados deve ser contínua, havendo um controlo na dimensão máxima e mínima do agregado, de modo a que posteriormente não haja efeitos de segregação no betão e este possa ser colocado e compactado à volta das armaduras.

A forma dos agregados influencia propriedades do betão como: a consistência, ângulo de atrito interno, compacidade e todas as que dependem da quantidade de água da amassadura [51], [52]. Partículas com formas alongadas vão ter tendência a partir sob ação de esforços concentrados.

Os materiais agregados podem estar sujeitos a reações químicas tanto com os constituintes do cimento como com a água, podendo originar expansões que levam à destruição do betão. Os agregados a utilizar devem ser provenientes de rochas com tensões de rotura à compressão superior a 60-70 MPa, valor que os agregados correntemente utilizados em Portugal possuem [51], [52]. Para betões com resistência à compressão muito elevada é necessária a utilização de agregados com tensões de rotura superiores [53].

As características e correspondentes valores limites que os agregados devem respeitar, no que se refere à durabilidade, para serem usados no fabrico de argamassas e betões encontram-se na norma EN 12620 [54] para agregados normais ou pesados e EN 13055-1 [55] para agregados leves.

### 3.4.7 Adjuvantes

Um adjuvante é um material adicionado durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa do cimento, para modificar as propriedades do betão

fresco ou endurecido [1]. São introduzidos usualmente na forma líquida e em proporções relativamente pequenas, durante o processo de dosagem.

A escolha de um adjuvante deve ser feita de acordo com as propriedades que se deseja obter ou melhorar, as características específicas de cada produto, os efeitos a curto e longo prazo, a estabilidade química, a homogeneização, a normalização, os ensaios de compatibilidade (quando é utilizado mais que um adjuvante).

Existem diversos tipos de adjuvantes que consoante as suas finalidades, podem ser utilizados para:

- Melhorar a resistência aos ciclos gelo/degelo
- Introdução de ar
- Compensação da retração
- Aumento das tensões iniciais de rotura
- Diminuição da permeabilidade aos líquidos
- Inibição da segregação e da sedimentação do cimento nas caldas de injeção
- Redução da exsudação
- Aceleração ou retardamento do processo de presa
- Aceleração ou retardamento do endurecimento
- Aumento da aderência ao agregado e às argamassas e betões endurecidos
- Aumento da aderência às armaduras
- Redução da absorção capilar do betão endurecido
- Produção de propriedades fungicidas, germicidas e inseticidas
- Ajudar a bombagem dos betões pobres
- Impedir ou diminuir a corrosão das armaduras
- Permitir alcançar propriedades que de outro modo possam não ser possíveis de obter
- Obter composições mais económicas
- Aumento da trabalhabilidade
- Modificação da viscosidade.

A quantidade total de adjuvantes não deve ultrapassar 50 g de adjuvantes por kg de cimento, a menos que a influência de uma maior dosagem no desempenho e na durabilidade do betão se encontre estabelecida. A dosagem de adjuvantes não deve ser inferior a 2 g/kg de cimento. Só são permitidas quantidades menores se estes forem dispersos em parte da água da amassadura [56].

As especificações para os mesmos estão presentes na norma NP EN 934-2 – Adjuvantes para Betão [57].

### 3.4.8 Idade

A resistência à compressão de um betão aumenta de acordo com a sua idade. A Figura 3.6 mostra a relação da idade do betão em meses, com a percentagem da resistência à compressão obtida pelo mesmo betão.

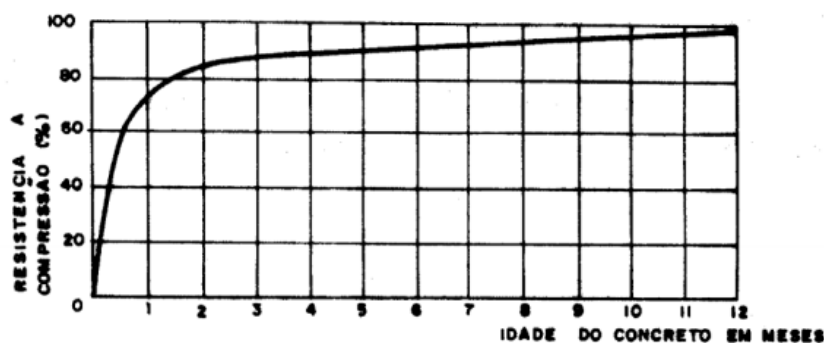


Figura 3.6 - Relação entre a resistência à compressão do betão e a sua idade em meses (extraído de [38])

De acordo com o gráfico continua a aumentar a resistência à compressão do betão à medida que a idade aumenta.

### 3.4.9 Compactação

O objetivo da compactação, é tornar o betão o mais compacto possível, provocando a saída de ar e facilitando o arranjo interno de partículas, diminuindo o atrito interno entre as mesmas. Os métodos existentes são o apiloamento e a vibração, sendo que o primeiro apenas se usa para betões extremamente fluidos.

A vibração consiste numa distribuição de energia mecânica na massa do betão, que se opõe às ligações de contacto suprimindo o atrito interno, facilitando a compactação formada pelo peso próprio dos componentes do betão e facilitando a expulsão de ar. A vibração produzida pelos aparelhos vibradores é obtida geralmente pela rotação de uma massa excêntrica em torno de um eixo e por isso tem natureza sinusoidal [58].

A vibração pode ser externa ou interna. A vibração externa pode ser feita de três formas: com um vibrador ligado à face do molde, através de mesas vibratórias, através de uma régua vibrante aplicada à superfície do betão. A vibração interna é única e exclusivamente feita através duma agulha vibratória que se introduz verticalmente no betão.

A vibração interna apresenta mais vantagens que a externa, motivo pela qual é mais utilizada tanto em obra, como em laboratório, e conduz a compacidade superiores.



Figura 3.7 - Exemplo de agulha vibratória (extraído de [52])

Uma má vibração do betão fará com que haja espaços vazios no seu interior que, após o endurecimento, poderão ficar visíveis ou não, implicando uma maior porosidade no betão e fazendo com que seu valor de resistência seja menor do que em circunstâncias normais.

### **3.4.10 Moldes de fabrico**

Diversos estudos têm vindo a provar que o material em que o molde é fabricado tem influência no valor da resistência à compressão. Entre eles, Carrasquillo et al. [59] em 1988, já enunciava que o material de fabrico dos moldes influenciava o valor da resistência à compressão. Imam et al. [21] testou vários provetes de betão de diferentes dimensões em moldes de ferro fundido e em moldes de plástico e concluiu que os provetes de betão concebidos em moldes de plástico tinham um valor de resistência inferior aos provetes de betão produzidos em moldes de ferro fundido. Tal também foi válido para provetes cilíndricos de betão betonados em moldes de ferro que apresentaram um valor superior de resistência em relação aos provetes cilíndricos de betão betonados utilizando moldes de plástico.

Estudos mais recentes de Maia L. et al. [31], em 2012, comparam valores de resistência entre provetes de betão fabricados em moldes de ferro e provetes de betão fabricados em moldes de poliuretano e concluem que os provetes feitos em moldes de ferro fundido apresentam valores de resistências superiores aos provetes produzido em moldes de poliuretano, sugerindo ainda que a causa desta ocorrência se deve possivelmente à temperatura que o provete atinge ou à planura das faces dos moldes [31].

### 3.4.11 Cura

A cura do betão serve para evitar que a água constituinte do betão se evapore rapidamente, tem como objetivos o desenvolvimento da resistência à compressão, diminuindo a sua retração e evitando a fendilhação. São criadas condições que igualem o ambiente em que o cimento está a desenvolver as suas reações de hidratação.

O objetivo da cura a temperaturas normais é manter o betão o mais saturado possível, até que os espaços inicialmente preenchidos por água, na pasta de cimento fresca, tenham sido ocupados pelos produtos de hidratação do cimento.

O processo de cura no geral, passa pelas seguintes etapas:

- Conservação e molhagem dos moldes em ambiente condicionado;
- Cobrir a sua superfície com água, areia, plásticos ou terra, de forma a limitar o mais possível a evaporação de água de dentro do betão;
- Aspersão com água em intervalos frequentes;
- Aplicação de membranas de cura (emulsões aquosas ou soluções em produtos resinosos ou parafínicos).

Existe também um processo denominado de cura acelerada, que difere da cura normal, e influencia a velocidade de endurecimento do betão, pois utiliza fatores como a temperatura e a humidade a seu favor. Este método consiste num pré-aquecimento do betão, em que a betoneira, a água e os inertes são aquecidos com vapor a 60°C e posteriormente os moldes são aquecidos entre 70° a 80°C com vapor de água. O objetivo é, através do aumento de temperatura, acelerar a presa e assim obter um ganho de resistência mais rápido. Tem como efeitos negativos o facto de ser um processo dispendioso pois requer mais energia, a água pode evaporar mais rapidamente e ao se adquirir uma presa mais rápida resultando num ganho de resistência mecânica mais rápido vai criar a longo prazo uma menor resistência mecânica em termos globais.

A Figura 3.8 mostra a relação entre o ganho da resistência mecânica do mesmo betão para quatro condições de cura diferentes.



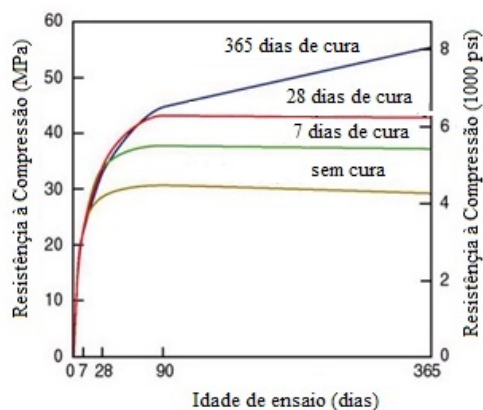


Figura 3.8 - Resistência à compressão de um betão sem cura e com diversas fases de cura (extraído de [54])

Analisando a Figura 3.8 concluímos que a cura do betão favorece o desenvolvimento da propriedade da resistência à compressão, tanto inicialmente como a longo prazo, e que um betão sem um processo de cura apresentara um valor menor de resistência à compressão.

A Figura 3.9 mostra a influência da temperatura na resistência à compressão em diferentes idades do betão:

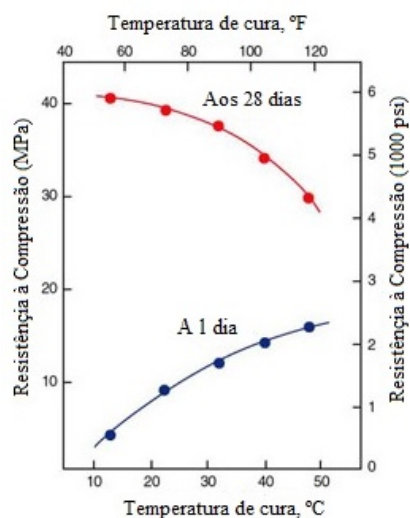


Figura 3.9 - Influência da temperatura na resistência à compressão de um betão de acordo com a sua idade (extraído de [54])

Analisando a Figura 3.9 podemos concluir que a resistência à compressão aumenta com a temperatura a que se efetua a cura para as primeiras idades do betão. Aos 28 dias, a tendência inverte-se, ou seja, com o aumento da temperatura verifica-se uma diminuição da resistência à compressão.

### **3.4.12 Causas acidentais**

As causas acidentais que afetam a resistência do betão estão relacionadas com três fatores:

- Características dos componentes
- Equipamentos de fabrico e mão-de-obra
- Amostragem no betão

Nas características dos componentes pode haver:

- Variações de qualidade do cimento (tensões de rotura e taxas de endurecimento fora do normal)
- Variações na granulometria dos agregados
- Variações no teor das impurezas
- Variações na temperatura dos componentes (devido à variação sazonal de temperaturas).

Nos equipamentos de fabrico ou mão-de-obra pode verificar-se:

- Variações acidentais na quantidade de cimento
- Variações acidentais na quantidade de agregado
- Variações acidentais na quantidade de água
- Variações acidentais na quantidade de adjuvantes
- Variações do tempo de amassadura
- Alterações na ordem de introdução dos componentes

Na amostragem do betão podem acontecer os seguintes tipo de erros:

- Erros de amostragem
- Variações acidentais do grau de compacidade das amostras
- Variações acidentais nas condições de cura
- Erros acidentais na determinação das tensões de rotura (devido ao atrito do provete com os pratos do equipamento de ensaio).

## 4. Programa Experimental

### 4.1 Betonagem dos provetes

Antes de cada betonagem é realizado um plano de betonagem onde se estrutura toda a logística de execução da mesma. Efetua-se em seguida a inspeção, preparação e limpeza dos moldes. A zona onde ocorre a betonagem deverá ser abrigada contra a radiação solar, vento forte, congelamento, água, chuva e neve. A Figura 4.1 mostra os moldes de fabrico utilizados para todas as betonagens realizadas.



Figura 4.1 - Moldes cúbicos e cilíndricos utilizados

Após as operações descritas estarem concluídas é realizada a colocação do betão nos carrinhos de mão, devendo este ser descarregado na vertical, a baixa altura, conforme ilustram as Figuras 4.2:



Figura 4.2 - Enchimento de carrinhos de mão com betão

Os moldes são totalmente preenchidos com betão e sujeitos a uma vibração inicial como demonstra a Figura 4.3:



Figura 4.3 – Enchimento dos moldes e vibração inicial

Após o total enchimento dos moldes procede-se novamente à vibração do betão, conforme mostra a Figura 4.4. Nas betonagens realizadas para o âmbito desta dissertação foi utilizado o vibrador como meio de vibração.



a) Cilindros

b) Cubos

Figura 4.4 – Vibração final dos moldes

Após a vibração não devem continuar a aparecer bolhas de ar à superfície. A vibração do betão tem por fim a minimização da segregação e diminuição dos espaços vazios existentes para a obtenção de um betão mais compacto.



Posteriormente à vibração do betão nos moldes procede-se ao uso de material próprio (pás, espátulas) para uniformizar a camada superficial como mostra a Figura 4.5. Em secções muito espessas é recomendada a re-compactação da camada superficial.



Figura 4.5 – Acabamento das superfícies

Os resultados finais dos provetes devidamente betonados apresentam-se na Figura 4.6:



a) Concremat



b) Sonangil

Figura 4.6 - Provetes após betonagem

## 4.2 Requisitos dos ensaios

### 4.2.1 Medições

De acordo com a NP EN 12390-3 [6] nos ensaios de betão endurecido é considerado boa prática incluir a medição da massa volúmica antes da determinação da resistência à compressão. Deste modo, todos os provetes tanto cúbicos como cilíndricos foram respetivamente pesados e posteriormente calculada a sua massa volúmica antes da realização do ensaio.

A massa volúmica dos provetes foi calculada através da seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{P}{V} \times \frac{g}{100} \quad (2)$$

Sendo:

$\gamma$  – Massa volúmica expressa em KN/m<sup>3</sup>

$P$  – Peso (kg)

$V$  – Volume do provete (m<sup>3</sup>)

$g$  – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

## 4.2.2 Moldes

Para a execução dos moldes utilizaram-se moldes de ferro fundido, estanques, não absorventes e calibrados de acordo com as tolerâncias estabelecidas pela norma NP EN 12390-3 [6].

## 4.2.3 Provetes

Utilizaram-se provetes cúbicos e cilíndricos em conformidade com os requisitos da norma NP EN 12390-3 [6].

Para provetes cúbicos as dimensões nominais estipuladas apresentam-se na Figura 4.7:

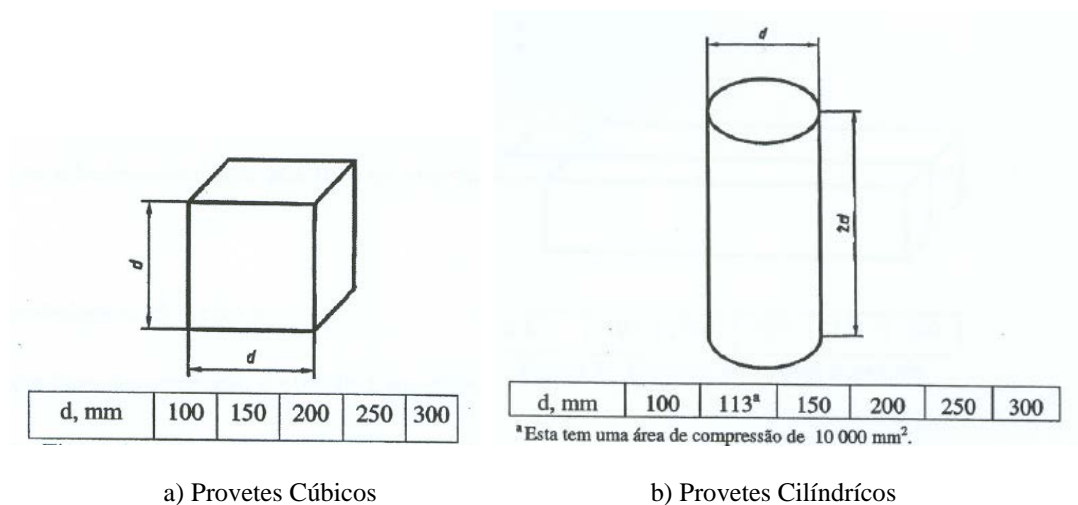


Figura 4.7 - Dimensões normalizadas de provetes

No âmbito desta dissertação foram utilizados cubos de 100 mm e de 150 mm e cilindros de 150 mm de diâmetro. De modo a uniformizar as superfícies dos provetes cilíndricos que irão estar em contato com os pratos da prensa, as suas faces de compressão foram retificadas na APEB – Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto.

## 4.3. Equipamentos Utilizados

### 4.3.1 Máquina de compressão - Prensa

Para os ensaios realizados na FCT/UNL foi utilizada uma prensa de compressão da marca FORM-TEST do tipo BETA2-3000E com uma capacidade máxima de 3000 kN. Para os ensaios realizados no IST/UL foi utilizada uma prensa de compressão de marca PERTA com capacidade máxima de 3000 kN para compressão e precisão de 0.1 kN. Ambas as máquinas de ensaio estão expostas na Figura 4.8.



a) FCT/UNL



b) IST/UL

Figura 4.8 - Máquinas de Ensaio

### 4.3.2 Instrumentação

Foram utilizados 2 defletómetros verticais TML com o propósito de medir os deslocamentos verticais. Os dois defletómetros verticais foram instalados em extremidades opostas do provete, por forma a medir o deslocamento longitudinal provocado pela compressão. A Figura 4.9

mostra o esquema de montagem dos defletómetros para provetes cúbicos e para provetes cilíndricos:

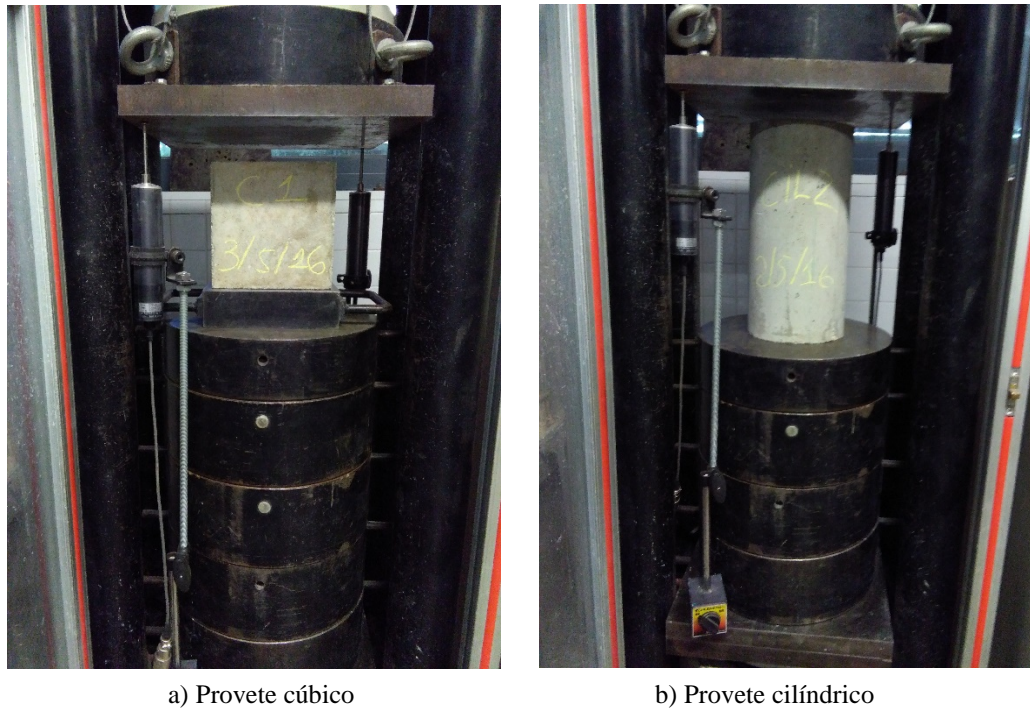


Figura 4.9 - Esquema de montagem dos defletómetros verticais

Os defletómetros elétricos foram ligados a unidades de aquisição de dados, modelo HBM Spider 8.

## 4.4 Ensaio Normalizado

### 4.4.1 Procedimento experimental

As etapas para o correto procedimento experimental são:

- Limpar o provete, removendo o excesso de humidade da superfície do mesmo antes de o colocar na máquina de ensaio (prensa).
- Entre o provete e os pratos da prensa apenas utilizar pratos auxiliares ou blocos de espaçamento caso seja necessário. Em caso de utilização, os mesmos devem estar alinhados com as faces superior e inferior do provete a ensaiar.
- Os provetes devem ser posicionados de forma a que as faces planas fiquem em contacto com os pratos da prensa.
- Centrar o provete relativamente ao prato inferior com uma exatidão de  $\pm 1\%$  da dimensão designada do provete cubico ou diâmetro designado do provete cilíndrico.



#### 4.4.2 Aplicação da carga

A norma NP EN 12390-3 [6] refere que os valores recomendados para a velocidade da aplicação de carga devem estar no intervalo de 0.2 MPa/s a 1.0 MPa/s.

Estes valores de velocidade limite foram obtidos através da expressão (3) de acordo com o volume de cada provete.

$$v = v_1 \left( \frac{\text{MPa}}{\text{s}} \right) \times A_c \quad (3)$$

Sendo,

$v$  – velocidade aplicação de carga (em kN/s)

$v_1$  – velocidade normalizada (em MPa/s)

$A_c$  – Área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, calculada com base na dimensão designada do provete

Para os cubos de 100x100x100 mm<sup>3</sup>, cujo valor  $A_c$  é de 1000 mm<sup>2</sup> foi obtida uma velocidade de carga de 5.0 kN/s. Para os cubos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> cujo valor  $A_c$  é de 17662.5 mm<sup>2</sup> foi obtida uma velocidade de carga de 11.25 kN/s. Para os cilindros de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) cujo valor  $A_c$  é de 22500 mm<sup>2</sup> foi obtida uma velocidade de carga de 8.8 kN/s.

A carga deve ser aplicada sem choques e aumentada de forma contínua, à velocidade constante seleccionada de  $\pm 10\%$  ate que não possa ser possível aplicar uma carga maior. Deverá ser indicado o registo da carga máxima e verificar se a rotura obtida é satisfatória A resistência à compressão é dada pela expressão (4) e deverá ser expressa com aproximação aos 0.5 MPa (N/mm<sup>2</sup>).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4)$$

Sendo,

$f_c$  – Resistência à compressão (em MPa)

$F$  – Carga máxima que o provete suportou

$A_c$  – Área de secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, calculada com base na dimensão designada do provete.

### 4.4.3 Tipo de rotura

A rotura pode ser satisfatória ou não satisfatória.

A rotura satisfatória em provetes cúbicos consiste em todas as quatro faces expostas estarem fissuradas aproximadamente da mesma maneira, embora com pequenos danos na face dos pratos, enquanto que a rotura satisfatória em cilindros apresenta aproximadamente uma forma cónica.

As Figuras 4.10 e 4.11 ilustram respetivamente, as roturas satisfatorias em provetes cúbicos e as roturas satisfatórias em provetes cilíndricos.

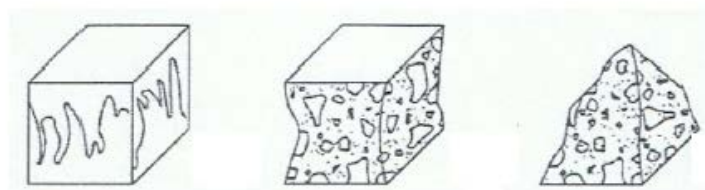


Figura 4.10 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (extraído de [6])

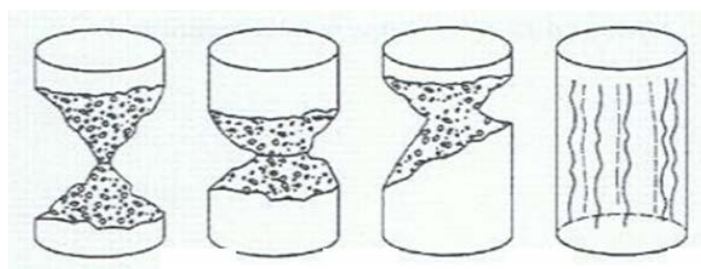


Figura 4.11 - Roturas satisfatórias em provetes cilíndricos (extraído de [6])

As roturas não satisfatórias (ver Figuras 4.12 e 4.13) podem ocorrer devido a defeitos na máquina de ensaio ou insuficiente atenção aos procedimentos de ensaio, em especial ao posicionamento do provete. No caso de ocorrerem devem ser registadas indicando a forma de rotura tanto para provetes cúbicos como para provetes cilíndricos.

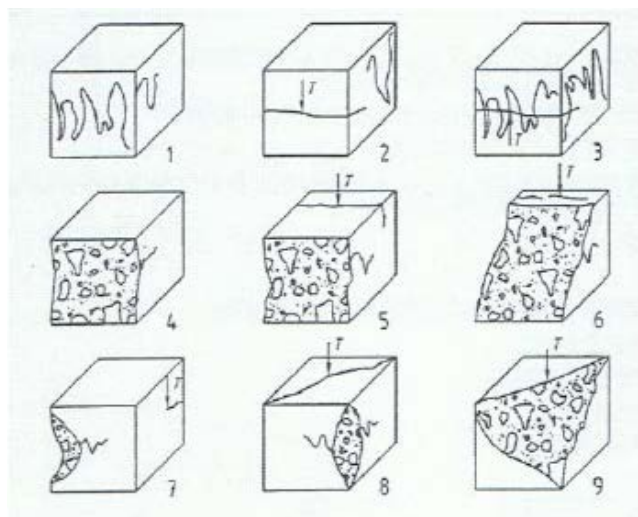


Figura 4.12 - Roturas não satisfatórias em provetes cúbicos (extraído de [6])

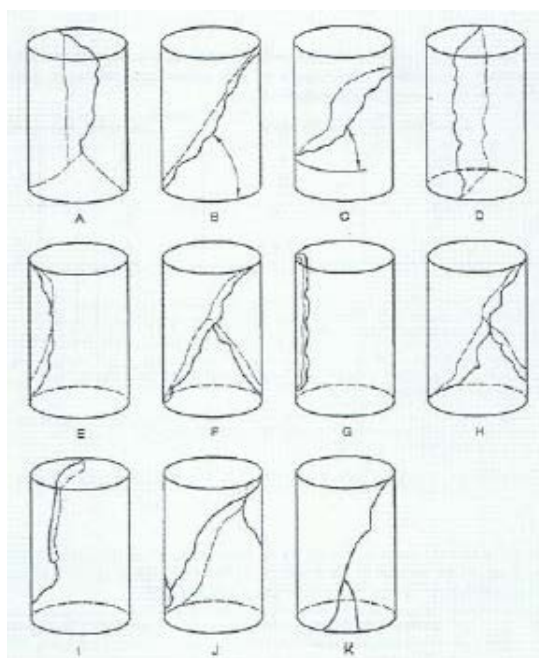


Figura 4.13 - Roturas não satisfatórias em provetes cilíndricos (extraído de [6])

A resistência do betão apresenta uma variabilidade significativa resultante quer da própria heterogeneidade do material, quer das condições de fabrico. Assim, a resistência é caracterizada pelo valor característico dos resultados obtidos e pelo coeficiente de variação associado a esta [43].

Admitindo que a resistência à compressão segue uma distribuição normal, ou curva de Gauss, considera-se que a resistência característica do betão ( $f_{cm}$ ) é o valor que apresenta 95% de probabilidade de ser excedido, conforme ilustra a Figura 4.14 [43].

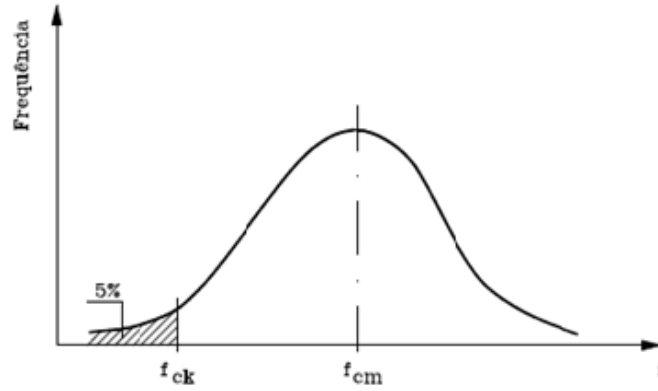


Figura 4.14- Valor característico da resistência (extraído de [43])

A resistência característica é dada pela seguinte expressão:

$$f_{ck} = (1 - 1.64\delta) \times f_{cm} \quad (5)$$

Sendo,

$f_{ck}$  - resistência característica do betão

$f_{cm}$  - média aritmética das tensões de rotura

A média aritmética das tensões de rotura é dada pela expressão:

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n f_{ci} \quad (6)$$

Sendo,

$n$  - número de amostras de ensaio

$f_{ci}$  - valor de rotura de cada amostra

O coeficiente de variação dos valores medidos é dado pela expressão:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)^2} \quad (7)$$

Sendo,

$f_{ci}$  – valor de rotura cada amostra

$n$  - número de amostras de ensaio

$f_{cm}$  - média aritmética das tensões de rotura

O coeficiente de variação  $\delta$  é determinado pela qualidade das condições de execução no fabrico do betão e tem o seu próprio intervalo de valores aceitáveis sendo que um valor superior a 0.25 não é admissível na execução de estruturas de betão armado [43]. O coeficiente de variação  $\delta$ , deve variar entre 0.20 a 0.25 para condições de execução médias, 0.15 a 0.20 para condições de execução boas e de 0.10 a 0.15 para condições de execução muito boas.

## 4.5 Composições dos betões utilizados

As betonagens realizadas no âmbito desta dissertação foram efetuadas em quatro centrais diferentes (SECIL, CONCREMAT, SONANGIL e LENOBETÃO) e uma foi realizada na FCT/UNL.

Apresentamos em seguida as composições relativas às betonagens realizadas.

### 4.5.1 Betonagens realizadas na CONCREMAT

A composição utilizada no fabrico destes betões foi a seguinte:

Tabela 4.1 - Composição do betão da CONCREMAT em kg/m<sup>3</sup>

Constituintes	Tipo de Betão	
	C30/37	C40/50
CEM I 42,5 R	239.00	288.00
Filer	200.00	157.00
Brita 1	895.00	885.00
Bago Arroz	304.00	301.00
Areia	590.00	584.00
Superplastificante	3.50	4.49
Água	142.00	142.00

### 4.5.2 Betonagens realizadas na LENOBETÃO

A composição utilizada para o betão de dia 25/08 foi a seguinte:

Tabela 4.2 - Composição do betão da LENOBETÃO em kg/m<sup>3</sup>

Constituintes	Betão C12/15
Cimento	175.00
Areia Fina	275.00
Areia Grossa	660.00
Brita 1	305.00
Brita 2	694.00
Cinza	65.00
Plastificante	2.40
Água	152.00

Para as betonagens de dia 08/08 e dia 12/08 a composição utilizada foi a seguinte:

Tabela 4.3 - Composição do betão da LENOBETÃO em kg/m<sup>3</sup>

Tipo de betão	C12/15	C20/25
Cimento	280.00	330.00
Areia	822.90	769.60
Gravilha 5/15	449.00	443.00
Brita 15/30	985.00	1027.00
Água	120.00	110.00

O betão de dia 08/08 é um betão de regularização que corresponde ao betão C12/15 com plastificante.

### 4.5.3 Betonagens realizadas na SECIL

Os betões fabricados na central da SECIL têm a seguinte composição:

Tabela 4.4 - Composição do betão da SECIL em kg/m<sup>3</sup>

Betão 30/37	
Constituintes	Quantidades
CEM II/A-L 42,5 R	330.00
Areia Lavada 0/2	250.00
Areia Lavada	350.00
Brita 1	900.00
Pó de Pedra	360.00
Adjuvante	2.64
Água	150.00

#### 4.5.4 Betonagens realizadas na SONANGIL

A Tabela 4.5 apresenta a composição da betonagem de dia 20/04/16 realizada na SONANGIL:

Tabela 4.5 - Composição do betão da SONANGIL em kg/m<sup>3</sup>

<b>Betão C25/30</b>	
<b>Constituintes</b>	<b>Quantidades</b>
<b>CEM II 42,5 R</b>	227.00
<b>Areia Fina</b>	277.00
<b>Areia Grossa</b>	633.00
<b>Brita 1</b>	449.00
<b>Brita 2</b>	495.00
<b>Cinzas</b>	53.00
<b>Plastificante</b>	1.50
<b>Água</b>	121.00

A Tabela 4.6 apresenta a composição da betonagem de dia 08/06/16 realizada na SONANGIL:

Tabela 4.6 - Composição do betão da SONANGIL em kg/m<sup>3</sup>

<b>Betão C20/25</b>	
<b>Constituintes</b>	<b>Quantidades</b>
<b>CEM II 42,5 R</b>	205.00
<b>Areia Fina</b>	313.00
<b>Areia Grossa</b>	619.00
<b>Brita 1</b>	445.00
<b>Brita 2</b>	491.00
<b>Cinzas</b>	46.00
<b>Plastificante</b>	2.00
<b>Água</b>	106.00

A Tabela 4.7 apresenta a composição da betonagem de dia 16/06/16 realizada na SONANGIL:

Tabela 4.7 - Composição do betão da SONANGIL em kg/m<sup>3</sup>

<b>Betão C30/37</b>	
<b>Constituintes</b>	<b>Quantidades</b>
<b>CEM II 42,5 R</b>	260.00
<b>Areia Fina</b>	228.00
<b>Areia Grossa</b>	642.00
<b>Brita 1</b>	441.00
<b>Brita 2</b>	492.00
<b>Cinzas</b>	60.00
<b>Plastificante</b>	1.20
<b>Água</b>	145.00

### 4.5.5 Betonagens realizadas na FCT/UNL

A Tabela 4.8 apresenta a composição da betonagem de dia 11/03/16 realizada na FCT/UNL:

Tabela 4.8 - Composição do betão da FCT/UNL em kg/m<sup>3</sup>

<b>Betão reforçado com fibras</b>	
<b>Constituintes</b>	<b>Quantidades</b>
<b>CEM II/B-L 32,5 R</b>	430.00
<b>Areia 0/2</b>	375.00
<b>Areia 0/4</b>	445.00
<b>Brita 1 6/12</b>	450.00
<b>Brita 2 11/22</b>	430.00
<b>Adjuvante</b>	5.20
<b>Água</b>	158.00
<b>Fibras</b>	60.00



## 5. Análise de Resultados

### 5.1 Resultados obtidos

Foram realizadas 22 betonagens e ensaiadas de acordo com os procedimentos descritos no capítulo anterior. Foram utilizados provetes de forma cúbicas de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e provetes de forma cilíndrica com Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura).

Foram testados um total de 66 provetes com várias idades. Para cada betonagem foram ensaiados à compressão 3 provetes de cada uma das dimensões anteriormente referidas, dos quais se apresenta o resultado médio dos mesmos. Analisou-se a influência da velocidade de carregamento, o tipo de máquina de compressão e diferença entre curas húmidas e secas. Todos os coeficientes de variação  $\delta$ , dos resultados dos ensaios realizados estão abaixo de 0.10, o que indica condições de ensaio muito boas.

Também contribuíram para este estudo diversos investigadores com os seus resultados de resistências à compressão, realizados nos âmbitos das suas dissertações de mestrado ou de doutoramento.

São apresentados os resultados obtidos de acordo com a data da betonagem, idade de ensaio e local onde foi feita a betonagem. Para tal, nas tabelas 5.1 a 5.4 utilizaram-se as seguintes designações:

“SN” – Betonagem realizada na Central da Sonangil;

“CM” – Betonagem realizada na Central da Concremat;

“LB” – Betonagem realizada na Central da LenoBetão

“SC” – Betonagem realizada na Central da Secil

“FCT” – Betonagem realizada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Para cada um dos resultados obtidos, foram calculadas as relações de resistência à compressão de provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) com provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e de provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> com provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>.

#### 5.1.1 Resultados aos 7 dias

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam exemplos de roturas obtidas para os provetes aos 7 dias de idade:



a) Provete cúbico de 100x100x100 mm<sup>3</sup>



b) Provete cúbico de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

Figura 5.1 – Rotura de provetes cúbicos



Figura 5.2 – Rotura de um provete cilíndrico de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) aos 7 dias de idade

Os resultados obtidos aos 7 dias de idade em provetes cilíndricos e cúbicos curados ao ar, assim como as relações entre si apresentam-se na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) aos 7 dias de idade

Data Betonagem	Fab.	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
20/04/2016	SN	30.44	34.67	31.08	0.98	1.12
12/10/2016	CM	47.45	47.00	49.42	0.96	0.95
17/10/2016	CM	44.7	47.93	47.79	0.94	1.00
19/10/2016	CM	39.95	48.03	45.30	0.88	1.06
24/10/2016	CM	35.78	45.30	44.84	0.80	1.01
26/10/2016	CM	45.93	54.03	49.76	0.92	1.09
				Média	0.93	1.04
				δ	0.004	0.004

Analisando a tabela no que diz respeito às relações de resistência podemos concluir que a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> oscila entre 0.80 e 0.98, sendo a média dos resultados de 0.93. No que diz respeito à relação de resistência à compressão entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e de 150x150x150 mm<sup>3</sup> os resultados variam entre 0.95 e 1.12, tendo uma média de valores de 1.04.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram as regressões lineares feitas com base nos dados da Tabela 5.1 anterior:

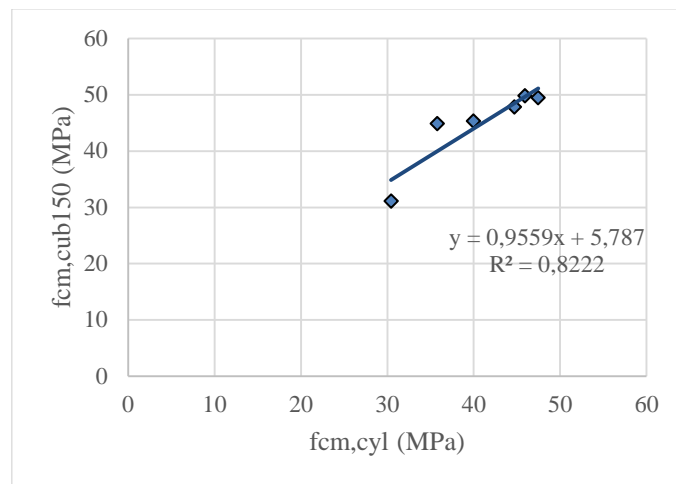


Figura 5.3 – Relação de resistências obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> aos 7 dias de idade

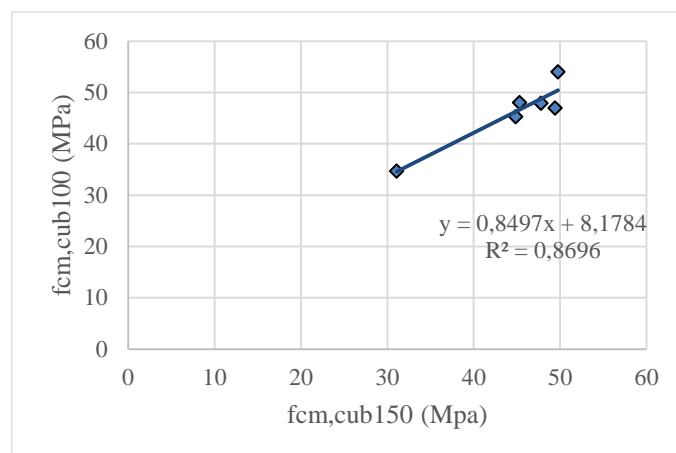


Figura 5.4 – Relação de resistências obtida utilizando provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> aos 7 dias de idade

O coeficiente de determinação de ambas as relações é próximo de 0.90, o que indica que o modelo é explicativo sendo os valores bem ajustados à amostra.

### 5.1.2 Resultados aos 14 dias

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam exemplos de roturas obtidas para os provetes aos 14 dias de idade:



a) Provede cúbico de 100x100x100 mm<sup>3</sup>



b) Provede cúbico de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

Figura 5.5 - Rotura de provetes cúbicos



Figura 5.6 - Rotura de um provede de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) aos 14 dias de idade

Os resultados obtidos de resistência à compressão em provetes cilíndricos e cúbicos aos 14 dias de idade curados ao ar, assim como a sua relação apresentam-se na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) aos 14 dias de idade

Data Betonagem	Fab.	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
18/03/2016	CM	—	58.57	53.96	—	1.09
21/03/2016	CM	56.25	60.33	57.57	0.98	1.05
20/04/2016	SN	34.24	34.60	34.24	1.00	1.01
12/10/2016	CM	52.00	53.23	58.70	0.89	0.91
17/10/2016	CM	49.74	55.00	52.19	0.95	1.05
19/10/2016	CM	46.20	53.83	52.00	0.89	1.04
24/10/2016	CM	42.48	50.43	49.75	0.85	1.01
26/10/2016	CM	49.85	55.17	54.95	0.91	1.00
Média				0.91	1.02	
$\delta$				0.003	0.002	

Analisando a Tabela 5.2 em termos de relações de resistência, concluímos que a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> oscila entre 0.85 e 1 sendo a sua média de valores de 0.91. Na relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> os valores oscilam entre os 0.91 e 1.09 sendo a sua média de 1.02.

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam as relações de resistência obtidas utilizando os dados da tabela anterior:

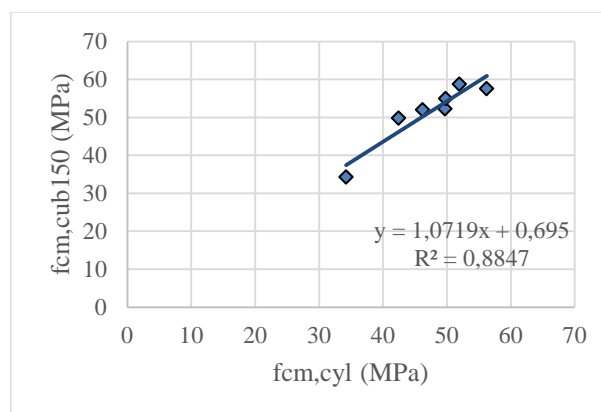


Figura 5.7 – Relação de resistências obtidas utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> aos 14 dias de idade

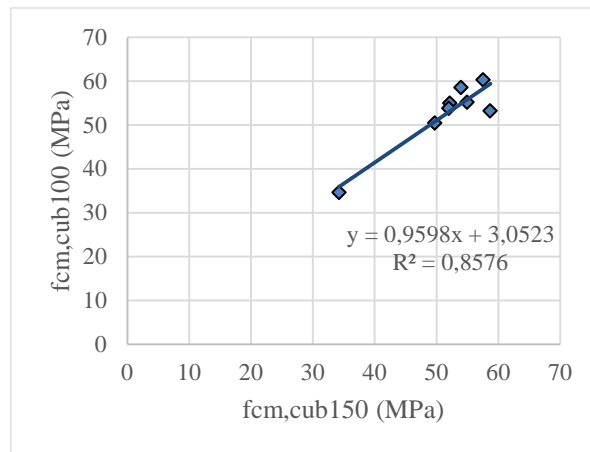


Figura 5.8 – Relação de resistências obtidas utilizando provetes cúbicos de 100x100x100 mm³ com cúbicos de 150x150x150 mm³ aos 14 dias de idade

O coeficiente de determinação de ambas as relações de resistência à compressão é próximo de 0.90 o que indica sendo bastante próximo de 1, o que indica que o modelo é explicativo sendo os valores bem ajustados à amostra.

### 5.1.3 Resultados aos 28 dias

Apresentam-se em seguida exemplos de roturas obtidas para os provetes aos 28 dias de idade:



a) Provete cúbico de 100x100x100 mm³



b) Provete cúbico de 150x150x150 mm³

Figura 5.9 – Rotura de provetes cúbicos



Figura 5.10 – Rotura de um provete de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) com a presença de defletómetros verticais

Os resultados obtidos de resistência à compressão em provetes cilíndricos e cúbicos aos 28 dias de idade curados ao ar, assim como a sua relação estão expostos na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) aos 28 dias de idade

Data Betonagem	Fab.	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
04/03/2016	CM	48.74	56.10	51.96	0.94	1.08
11/03/2016	FCT	–	75.30	71.84	–	1.05
16/03/2016	CM	47.91	55.03	52.19	0.92	1.05
18/03/2016	CM	54.51	57.17	57.38	0.95	1.00
21/03/2016	CM	62.00	66.87	65.72	0.94	1.02
20/04/2016	SN	37.09	39.93	39.39	0.94	1.01
02/05/2016	SC	37.35	34.17	40.79	0.92	0.84
03/05/2016	SC	33.42	32.17	37.07	0.90	0.87
04/05/2016	SC	43.72	37.93	50.06	0.87	0.76
06/05/2016	SC	48.59	54.17	52.61	0.92	1.03
09/05/2016	SC	46.48	48.53	–	–	–
08/08/2016	LB	11.86	–	11.47	1.03	–
12/10/2016	CM	57.63	60.70	60.37	0.95	1.01
17/10/2016	CM	56.08	56.57	59.93	0.94	0.94
19/10/2016	CM	47.38	59.03	56.43	0.84	1.05
24/10/2016	CM	46.48	53.57	51.39	0.90	1.04
26/10/2016	CM	55.74	58.57	60.96	0.91	0.96
Média					0.92	0.98
δ					0.002	0.008

Os resultados de resistência à compressão obtidos de provetes betonados na FCT/UNL apresentam os maiores valores devido a ter sido utilizado um betão de alta resistência reforçado com fibras.

Analisando a Tabela 5.3 em termos de relações de resistência podemos averiguar que a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> oscila de 0.84 a 1.03 sendo a média dos valores de 0.92. A relação de resistência à compressão de provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> com provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> varia entre 0.76 e 1.08 sendo o seu valor médio de 0.98.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam as relações de resistência obtidas utilizando os dados da tabela anterior:

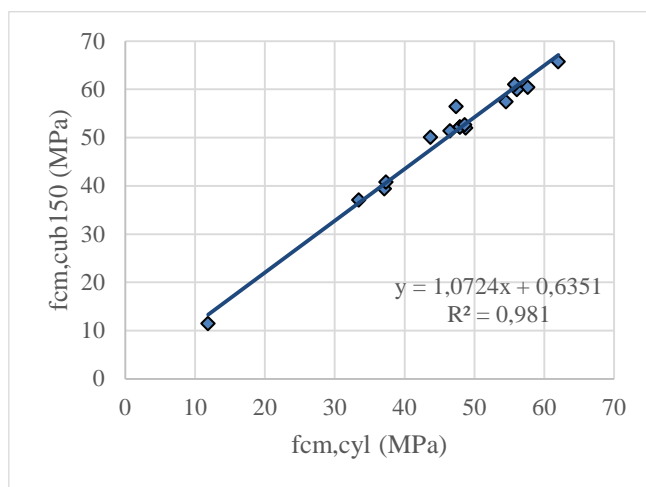


Figura 5.11 – Relação de resistências obtidas utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> aos 28 dias de idade

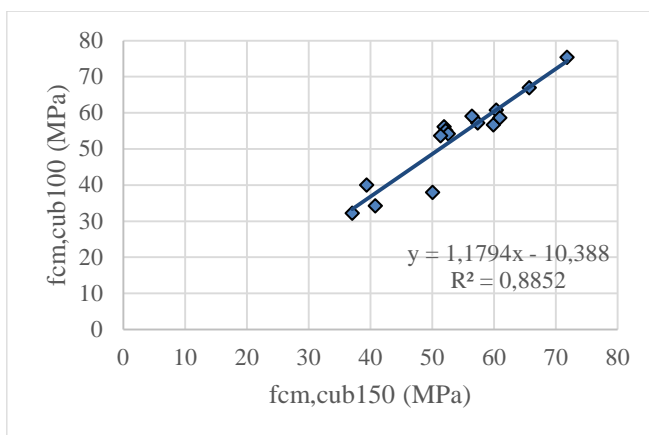


Figura 5.12 - Regressão linear feita com a relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> aos 28 dias idade

Como podemos observar na Figura 5.11 a regressão linear da relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos tem um coeficiente de determinação R



muito próximo 1, o que significa uma relação linear quase perfeita. No que diz respeito à Figura 5.12 o coeficiente de determinação da regressão linear é próximo de 0.90 o que também indica um bom modelo de regressão linear.

Para alguns dos provetes com 28 dias de idade, foram utilizados defletômetros para poder medição dos deslocamentos verticais durante o ensaio de compressão, são apresentados em seguida curvas representativas de tensão em função do deslocamento obtidas para cada três conjuntos de provetes, de acordo com a dimensão e forma utilizadas.

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam as curvas Força-Deslocamento obtidas para provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e 150x150x150 mm<sup>3</sup> e para provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) curados ao ar:

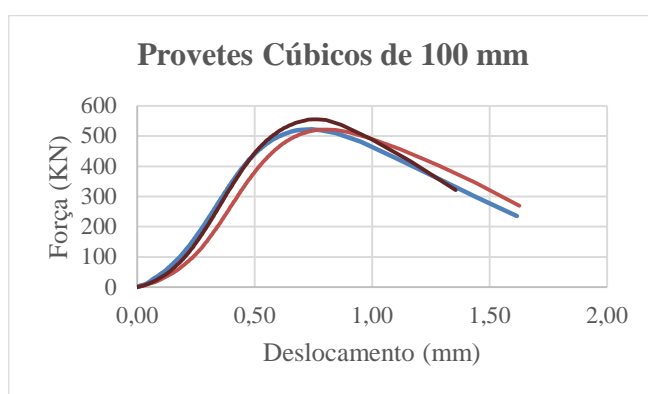


Figura 5.13 - Relação Força (em kN) com Deslocamento (em mm) para 3 ensaios de provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> de aresta aos 28 dias de idade

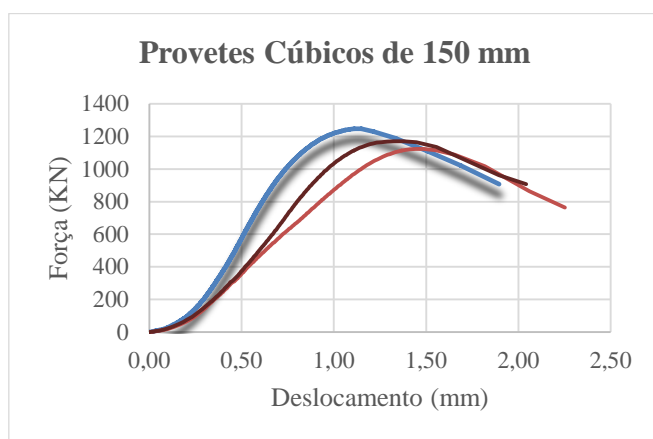


Figura 5.14 - Relação Força (em kN) com Deslocamento (em mm) para 3 ensaios de provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> de aresta aos 28 dias de idade

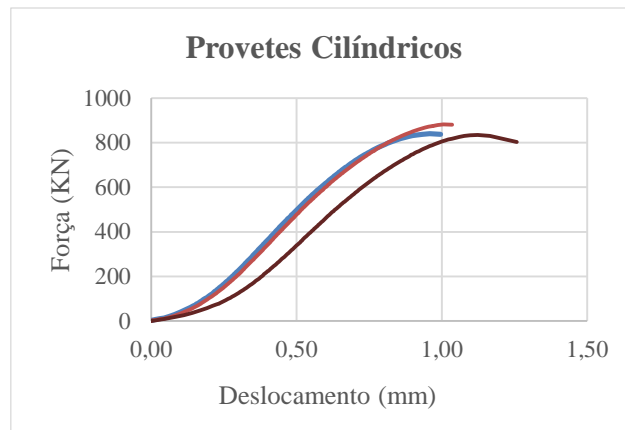


Figura 5.15 - Relação Força (em kN) com Deslocamento (em mm) para 3 ensaios de provetes cilíndricos de dimensões Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) aos 28 dias de idade

#### 5.1.4 Resultados obtidos para betões de outras idades

Os resultados obtidos de resistência à compressão em provetes cilíndricos e cúbicos em outras idades (expressas em dias) curados ao ar, assim como a relação de resistência à compressão entre os provetes estão expostos na Tabela 5.4:

Tabela 5.4 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) para várias idades

Data Betonagem	Fab,	Idade	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
12/09/2016	LB	25	21.54	—	24.18	0.89	—
25/08/2016	LB	43	15.41	—	16.10	0.96	—
16/06/2016	SN	139	31.75	34.33	38.76	0.82	0.89
05/05/2016	SC	172	41.03	42.93	45.91	0.89	0.94
18/03/2016	CM	215	55.85	55.07	54.47	1.03	1.01
Média						0.92	0.95
δ						0.006	0.004

Foi excluído o valor do resultado da betonagem de 08/06/2017 por ter uma variação superior a 15% da média. Em termos de relações de resistência podemos ver que para idades diferentes entre 25 e 215 dias a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> oscila entre 0.82 e 1.03 sendo a média de valores de 0.92. Para a relação de resistência à compressão de provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e de 150x150x150 mm<sup>3</sup> o valor oscila entre 0.89 e 1.01 sendo a média de 0.95.

A Figura 5.16 apresenta a relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>:

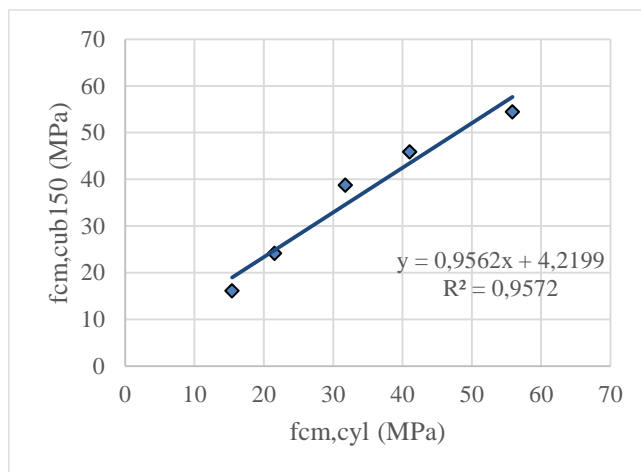


Figura 5.16 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

O coeficiente de determinação R é muito próximo de 0.90 indicando uma boa qualidade de regressão.

A Figura 5.17 mostra a relação de resistência obtida utilizando para provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>.

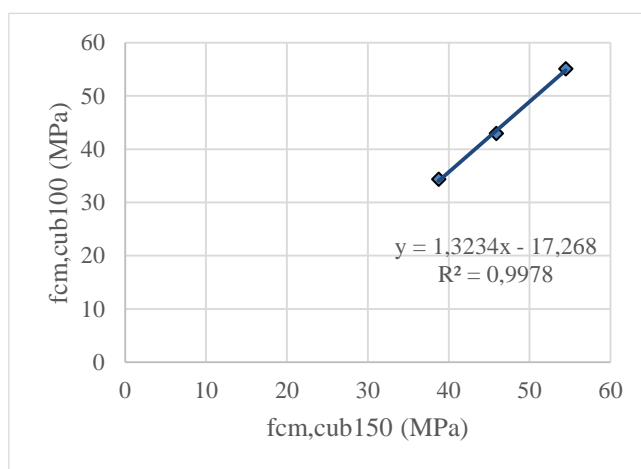


Figura 5.17 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

### 5.1.5 Resultados de M. Inácio, 2016:

No âmbito da sua tese de doutoramento Inácio M. [4] realizou ensaios de resistência à compressão em betões normais e em betões de elevada resistência curados em água.

A Tabela 5.5 mostra os seus resultados obtidos para os diferentes tipos de betão testado, assim como as suas idades de ensaio e respetivas relações:

Tabela 5.5 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) a várias idades(em dias) (adaptado de [4])

Modelo	Idade	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
<b>SNSC4</b>	65	35.9	34.2	1.05
<b>SHSC5</b>	62	58.0	58.8	0.99
<b>SHSC6</b>	52	23.0	25.1	0.92
<b>SHSC7</b>	60	24.7	24.3	1.02
<b>SHSC8</b>	107	38.9	36.0	1.08
<b>SHSC9</b>	102	39.1	37.2	1.05
<b>CHSC1</b>	68	61.6	66.3	0.93
<b>CHSC2</b>	70	45.9	46.5	0.99
<b>CHSC3</b>	89	48.9	52.5	0.93
Média				0.99
$\delta$				0.004

Analisando a Tabela 5.5, concluímos que o valor da relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> é muito próxima de 1, oscilando entre 0.92 e 1.08 sendo o seu valor médio de 0.99.

A Figura 5.18 mostra graficamente os dados da Tabela anterior assim como a sua regressão linear:

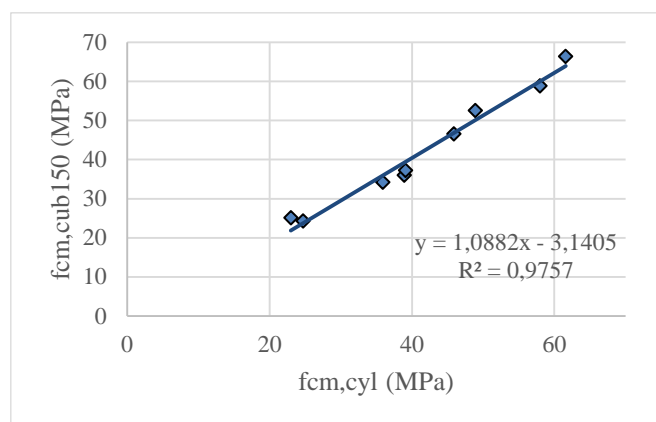


Figura 5.18 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

Observando a Figura 5.18 podemos ver uma relação linear quase perfeita com um coeficiente de determinação de 0.97 bastante próximo de 1, indicando uma grande fiabilidade de resultados.

### 5.1.6 Resultados de N. Gouveia, 2016:

Em 2016, N.D. Gouveia, no âmbito da sua tese de doutoramento da Universidade Nova de Lisboa, Caparica.”, realizou ensaios de resistência à compressão em betões normais e betões reforçados com fibras, ambos curados em água.

A Tabela 5.6 mostra os seus resultados obtidos para betão normal e a relações de resistência obtida, testados aos 60 dias de idade:

Tabela 5.6 - Resultados de resistência à compressão para betões normais aos 60 dias de idade (em MPa)

Modelo	Betão	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
<b>F0M4D</b>	BN1	63.4	62.2	1.02
	BN2	69.1	64.4	1.07
<b>F40M4D</b>	BN	66.4	67.9	0.98
<b>F40C4D</b>	BN	44.3	43.5	1.02
<b>F60M4D</b>	BN	64.9	68.6	0.95
<b>F60C4D</b>	BN	39.2	42.4	0.92
<b>F80M4D</b>	BN	63.6	66.5	0.96
<b>F80C4D</b>	BN	52.3	52.1	1.00
Média BN				0.99
$\delta$				0.002

A Tabela 5.7 mostra os seus resultados obtidos para betão reforçado com fibras e a respetiva relação de resistência obtida, testados aos 60 dias de idade:

Tabela 22 - Resultados de resistência à compressão para betões reforçados com fibras aos 60 dias de idade (em MPa)

Modelo	Betão	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
<b>F40M4D</b>	BRF	65.9	65.4	1.01
<b>F40C4D</b>	BRF	56.6	58.0	0.98
<b>F60M4D</b>	BRF	67.5	68.9	0.98
<b>F60C4D</b>	BRF	65.0	70.0	0.93
<b>F80M4D</b>	BRF	66.0	73.5	0.9
<b>F80C4D</b>	BRF	57.9	64.4	0.9
Média BR				0.95
$\delta$				0.002

Analisando as Tabelas 5.6 e 5.7 podemos concluir que a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de

150x150x150 mm<sup>3</sup> oscila entre 0.92 e 1.07 sendo a média dos valores de 0.99 para betões normais, enquanto que, para o betão reforçado com fibras a mesma relação varia de 0.90 a 1.07 e a sua média de valores é de 0.99.

As Figura 5.19 e 5.20 apresentam, respetivamente, as regressões lineares dos dados das tabelas 5.6 e 5.7:

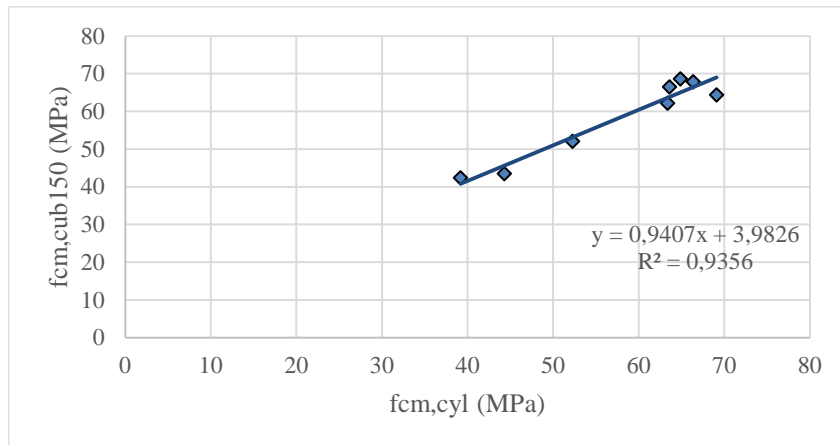


Figura 5.19 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

O coeficiente de determinação R está próximo dos 0.95 o que indica uma boa qualidade de regressão linear simples.

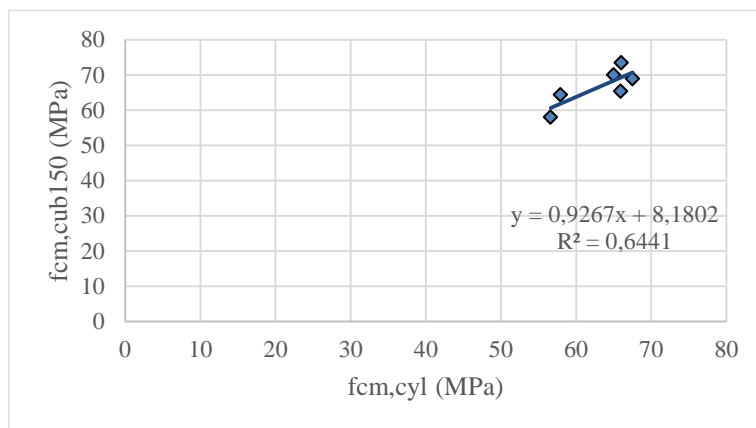


Figura 5.20 - Relação de resistência obtida utilizando provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e de 100x100x100 mm<sup>3</sup>

O coeficiente de determinação R é inferior a 0.7 o que indica uma qualidade razoável de regressão linear simples.

### 5.1.7 Resultados de C. Marchão, 2015:

No âmbito da sua tese de doutoramento C. Marchão [5], realizou ensaios de resistência à compressão a betões de alta resistência reforçados com fibras, curados ao ar e com idade de 28 dias. Foram utilizados provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura).

A Tabela 5.8 mostra os seus resultados obtidos dos betões de alta resistência reforçados com fibras aos 28 dias de idade e as relações entre si:

Tabela 5.8 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) aos 28 dias de idade (adaptado de [5])

Modelo	$f_{cm,cub100}$	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
HPFRC	119.7	116.7	112.2	1.04	1.07
HPFRC	118.5	97.8	109.0	0.90	1.09
HPFRC	112.7	–	106.7	–	1.06
HPFRC	103.2	–	101.6	–	1.02
			Média	0.97	1.06
			$\delta$	0.010	0.001

Analisando os dados da Tabela 5.8 podemos concluir que a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> apresenta uma média de 0.97 enquanto a relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> oscila entre 1.02 e 1.09 e apresenta uma média de 1.06.

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam graficamente os dados da Tabela anterior assim como as respetivas regressões lineares:

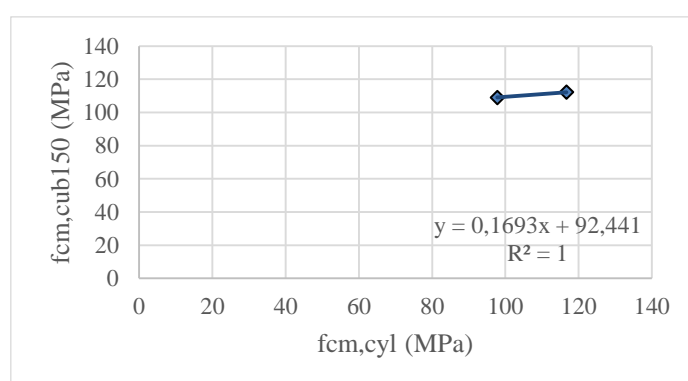


Figura 5.21 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

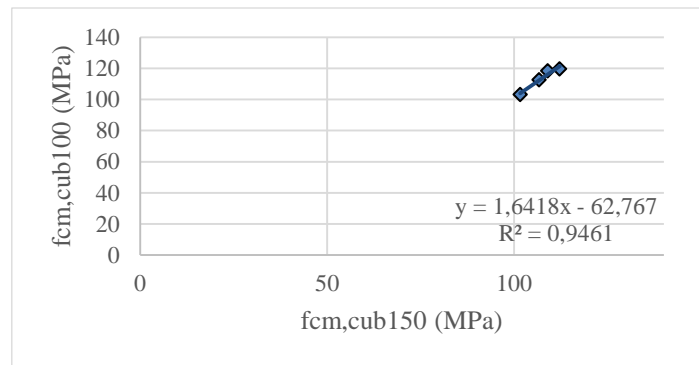


Figura 5.22 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

Analisando a Figura 5.22 a regressão apresenta um valor próximo de 0.95, que por sua vez é muito aproximado do valor 1 o que indica uma regressão quase perfeita.

### 5.1.8 Resultados de A. Almeida, 2016:

No âmbito da sua tese de doutoramento A. Almeida [60] realizou ensaios de resistência à compressão em vários tipos de betões, curados em água e com idade superior a 60 dias.

Os resultados apresentados na Tabela 5.9 representam uma média de valores de dois provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e uma média de três provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> que foram ensaiados da mesma betonagem, e respetivas relações de resistência.

Tabela 5.9 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) (adaptado de [60])

Designação	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
50% Cíclica	50.37	50.47	1.00
40% Cíclica	53.42	54.02	0.99
30% Cíclica	66.13	64.56	1.02
50% Radial	55.07	54.09	1.02
50% Cruz	59.11	58.00	1.02
Monotónica Pequena	41.10	40.49	1.02
Monotónica 0	33.59	33.87	0.99
Fitas 1	47.04	45.73	1.03
Fitas 2	46.70	47.20	0.99
Monotónica 1-1	53.11	53.07	1.00
Monotónica 1-2	48.04	48.64	0.99
Monotónica 2-1	52.98	53.84	0.98
Monotónica 2-2	51.79	51.16	1.01
Média			1.00
δ			0.000



Analisando a Tabela 5.8 podemos concluir que a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes de forma cúbica de 150x150x150 mm<sup>3</sup> varia entre 0.98 e 1.03 sendo a sua média de 1.00.

A Figura 5.23 apresenta graficamente os dados da Tabela anterior assim como a respetiva regressão linear:

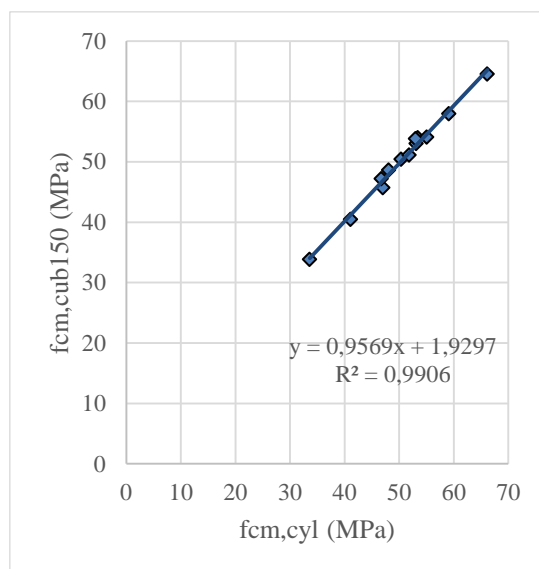


Figura 5.23 - Regressão linear feita com a relação de provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) com provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

A regressão apresenta um coeficiente de determinação muito próximo de 1 indicando uma óptima qualidade de modelo adaptado e consequentemente uma maior fiabilidade de resultados.

### 5.1.9 Resultados de R. Honório, 2016:

No âmbito da sua tese de mestrado Hónorio [61] realizou ensaios de resistência à compressão a betões com várias idades, curados ao ar.

A Tabela 5.10 mostra os resultados de resistência à compressão obtidos.

Tabela 5.10 - Resultados de resistência à compressão (em MPa) a várias idades (adaptado de [61])

Idade	$f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
<b>29</b>	65.3	61.2	0.94
<b>61</b>	81.6	81.5	1.00
<b>63</b>	65.7	67.8	1.03
<b>85</b>	74.5	71.7	0.96
		Média	0.98
		$\delta$	0.002

Analisando a Tabela 5.9 de valores podemos observar que a relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> oscila entre 0.94 e 1.03 e o seu valor médio é de 0.98.

A Figura 5.24 apresenta graficamente os dados da Tabela 5.9 assim como a sua regressão linear:

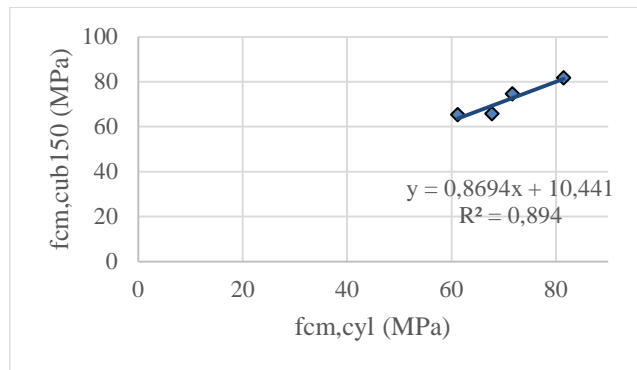


Figura 5.24 – Relação de resistência obtida utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>

Observando a Figura 5.14 vemos que o valor R do coeficiente de determinação é alto, sendo a regressão de muito boa qualidade.

## 5.2 Influência da Velocidade de Ensaio

De acordo com a secção 4.3.2 do presente documento indica as velocidades de aplicação das cargas nos ensaios experimentais de acordo com a secção e dimensão do provete. Para os cubos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> foi aplicada uma velocidade de carga de 5.0 kN/s, para os cubos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> foi aplicada uma velocidade de carga de 11.25 kN/s e para os cilindros de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) foi aplicada uma velocidade de carga de 8.8 kN/s. Para cubos da mesma betonagem foram alteradas as velocidades para outras diferentes. Todos os resultados apresentados em seguida foram betonados na central Secil.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão para provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> aos 28 dias de idade, para velocidades de aplicação de carga diferentes das anteriores. As velocidades estão expressas em kN/s.

Tabela 5.11 - Valores de velocidade utilizados para provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e 100x100x100 mm<sup>3</sup>

Data Betonagem	Vel, Cub 100	$f_{cm,cub100}$	% Diferença	Vel, Cub 150	$f_{cm,cub150}$	% Diferença
02/05/2016	5.00	34.17	6,0	11.25	40.79	0,1
02/05/2016	11.15	36.23		22.50	40.82	
03/05/2016	5.00	32.17	0,8	11.25	37.07	4,4
03/05/2016	11.15	32.43		22.50	38.70	
04/05/2016	5.00	37.93	9,5	11.25	50.06	3,1
04/05/2016	11.15	41.53		22.50	51.61	
06/05/2016	5.00	54.17	-0,1	11.25	52.61	-0,5
06/05/2016	2.50	54.10		5.00	52.35	

Para uma melhor interpretação de resultados da mesma amostra de betonagem, estes foram divididos em duas cores. A branco estão assinalados os resultados obtidos experimentalmente utilizando uma velocidade de aplicação normal de acordo com a dimensão do cubo. A cor diferente estão assinalados os resultados obtidos experimentalmente utilizando uma velocidade de aplicação de carga diferente da estipulada.

Analisando os dados da Tabela 5.10 podemos concluir que os resultados diferem de acordo com a velocidade de carga aplicada. Para velocidades superiores às estipuladas, tanto para cubos de 100x100x100 mm<sup>3</sup>, como para cubos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>, os resultados de resistência à compressão são superiores aos resultados obtidos a velocidades normais, entre 0,1% a 9,5 % de diferença de valor. Para velocidades inferiores às estipuladas o valor de resistência à compressão aparenta diminuir, no entanto mais provetes a velocidades inferiores deveriam ter sido testados para uma melhor conclusão.

### 5.3 Influência do Equipamento Utilizado

Foram realizados ensaios com duas máquinas de compressão diferentes. Um no laboratório de estruturas pesadas da FCT/UNL e outro no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais no IST/UL. Em ambos, foram realizados da mesma amostra com a mesma idade.

A Tabela 5.12 mostra os resultados obtidos para a resistência à compressão (em MPa) assim como os respetivos coeficientes de variação obtidos nos diferentes laboratórios:

Tabela 5.12 - Valores de resistência à compressão (em MPa), coeficientes de variação obtidos em laboratórios diferentes

Data da Betonagem	Idade (dias)	Laboratório FCT/UNL						Laboratório IST/UL					
		$f_{cm,cyl}$	$\delta$	$f_{cm,cub100}$	$\delta$	$f_{cm,cub150}$	$\delta$	$f_{cm,cyl}$	$\delta$	$f_{cm,cub100}$	$\delta$	$f_{cm,cub150}$	$\delta$
21/03/2016	28	61.15	0.04	68.02	0.09	70.08	0.03	62.00	0.078	66.87	0.046	65.72	0.021
08/08/2016	28	11.86	0.09	—	—	11.47	0.01	11.29	0.029	—	—	11.28	0.027
12/09/2016	25	20.27	0.01	—	—	23.31	0.04	21.54	0.040	—	—	24.18	0.016
25/08/2016	43	15.41	0.10	—	—	16.10	0.02	13.13	0.118	—	—	16.92	0.026

Analisando a Tabela 5.12 podemos concluir que os valores distam um pouco entre si, sendo os que apresentam uma relação mais fiável são os que têm coeficiente de variação mais baixo. Conclui-se que o tipo de equipamento tem influência no valor de resistência à compressão.

A Tabela 5.13 apresenta os valores obtidos das relações de resistência obtidas nos diferentes laboratórios.

Tabela 5.13 - Relações de resistência entre provetes obtidas em laboratórios diferentes

Data da Betonagem	Idade (dias)	Laboratório FCT/UNL		Laboratório IST/UL		% de diferença	
		$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$		
21/03/2016	28	0.94	1.02	0.87	0.97	7.1	4.6
08/08/2016	28	1.03	—	1.00	—	3.3	—
12/09/2016	25	0.89	—	0.87	—	2.1	—
25/08/2016	43	0.96	—	0.78	—	18.1	—

Analisando a Tabela 5.13 concluímos que os valores apresentam entre 7.08% e 18.11% de diferença nas relações de resistência sendo que a maior diferença de valores se encontra para os provetes cilíndricos da betonagem de dia 25/08. Os coeficientes de variação para os valores dos provetes desta betonagem são também os maiores, embora o de 0.10 indique que houve muito boas condições de ensaio e o de 0.12 indique que houve boas condições de ensaio tal como é enunciado na secção 4.3.5, pode ser a possível justificação para esta discrepância de valores.

Concluímos que o tipo de laboratório influencia nos resultados da resistência à compressão, e que para valores 10% diferentes não deverão ser aceites devido à discrepância de resultados.

## 5.4 Influência da Idade

Foram ensaiados aos 7, 14 e 28 dias diversos provetes provenientes da mesma betonagem por forma a conhecer a influência da idade nas relações de resistência obtidas utilizando provetes cilíndricos e cúbicos. A Tabela 5.14 apresenta as relações de resistência obtidas utilizando provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> assim como a relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>.

Tabela 5.14 - Relações de resistência entre provetes obtidas de acordo com as idades do betão

Idade	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
7	0,93	1,04
14	0,91	1,02
28	0,92	0,98

As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam graficamente os resultados obtidos para as relações de resistência da tabela anterior.

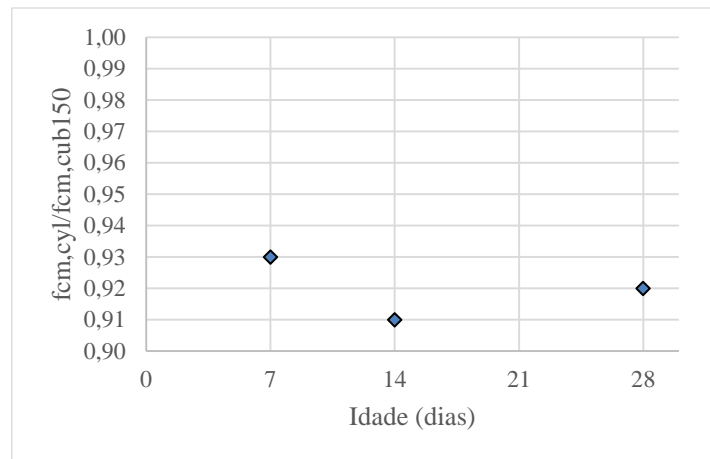


Figura 5.25 – Relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> em função da idade

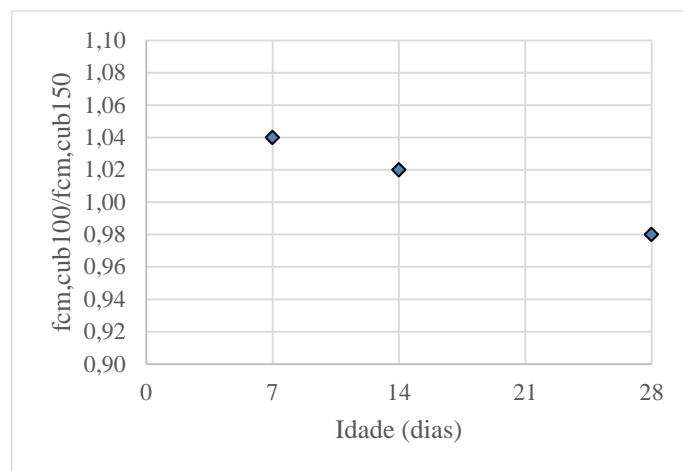


Figura 5.26 – Relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> em função da idade

A Figura 5.27 apresenta a conjugação os todos os dados apresentados neste capítulo, tanto do autor, como dos autores que contribuíram para este estudo para as relações de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> em função da idade de ensaio.

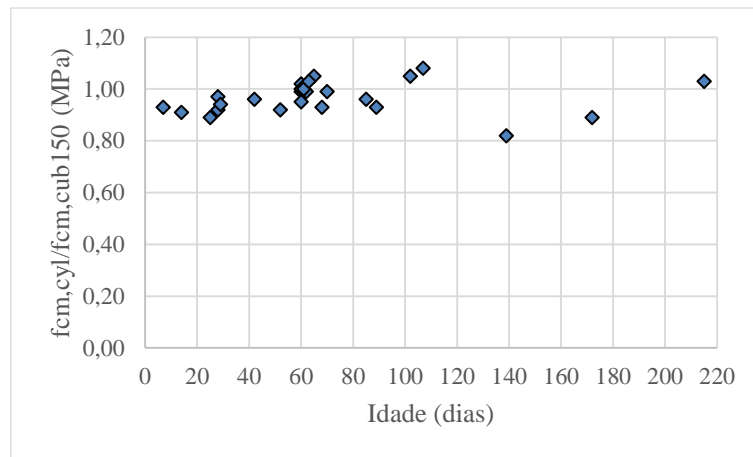


Figura 5.27 – Relação de resistência entre provetes cilíndricos de Ø150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> em função da idade

A Figura 5.28 apresenta graficamente as relações de resistência entre provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> em função da idade de ensaio, para todos os dados apresentados neste capítulo, tanto do autor, como dos autores que contribuíram para este estudo.

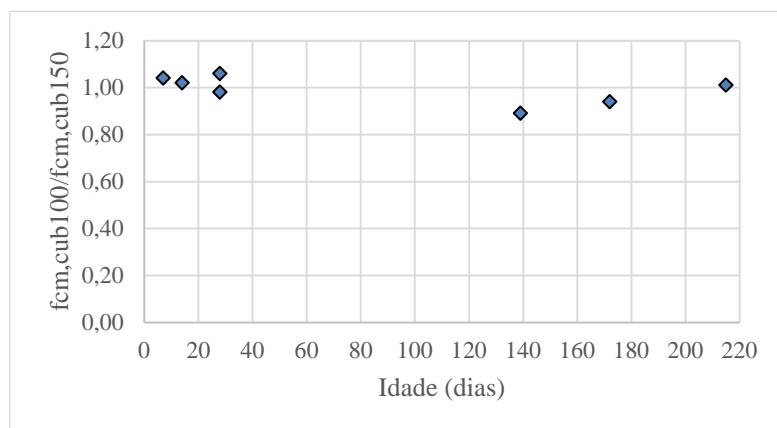


Figura 5.28 – Relação de resistência entre provetes cúbicos de 100x100x100 mm<sup>3</sup> e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> em função da idade

Podemos concluir que a idade não tem qualquer influência na relação de resistência à compressão entre provetes tanto cilíndricos como cúbicos.

## 5.5 Influência do Tipo de Cura

As tabelas 5.15 e 5.16 apresentam respectivamente a média dos dados obtidos, tanto do autor, como dos autores que contribuíram para este estudo, dos provetes curados ao ar, e dos provetes curados em água, assim como a respectiva relação de resistência entre provetes obtida.

Tabela 5.15 - Relações de resistência à compressão obtidas para provetes curados ao ar

<b>Autor</b>	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$	$f_{cm,cub100}/f_{cm,cub150}$
Sara C.	0,92	1,00
C. Marchão [5]	0,97	1,06
R. Honório [61]	0,98	–

Tabela 5.16 - Relações de resistência à compressão obtidas para provetes curados em água

<b>Autor</b>	$f_{cm,cyl}/f_{cm,cub150}$
M. Inácio [4]	0,99
N.D. Gouveia	0,99
	0,95
A. Almeida [60]	1

Analisando as tabelas podemos concluir que o tipo de cura não influencia os valores das relações de resistência entre provetes cilíndricos de Ø 150x300 mm<sup>2</sup> (diâmetro x altura) e provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup>. Para a relação de provetes cúbicos de 150x150x150 mm<sup>3</sup> com 100x100x100 mm<sup>3</sup> não é possível obter uma conclusão precisa derivado a só terem sido testados provetes com cura ao ar.





## 6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Conforme foi referido anteriormente, o principal objetivo desta dissertação é contribuir para o estudo da relação de resistência à compressão entre provetes cilíndricos e provetes cúbicos e testar a influência de parâmetros, tais como: idade, velocidade de aplicação de carga, máquina de ensaio e tipo de cura.

Assim podemos concluir:

- A relação de resistência à compressão em provetes cilíndricos de  $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^2$  (diâmetro x altura) com provetes cúbicos de  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ , é diferente da obtida na norma NP EN 206-1. Os resultados obtidos de ensaios experimentais realizados pelo autor apontam para uma média de 0.93 aos 7 dias, 0.91 aos 14 dias e 0.92 aos 28 dias de idade para provetes curados ao ar. Para outras idades a média dos valores obtidos para esta relação foi de 0.88.

- Os resultados obtidos de ensaios realizados por outros autores para provetes curados ao ar apresentam uma média de valores de 0.98 para a mesma relação de resistência aos 28 dias e uma média de 0.98 para provetes com idades diferentes.

- Ainda para a mesma relação de resistência, mas para provetes curados em água, obteve-se uma média de 0.98.

- No que diz respeito à relação de resistência entre provetes cúbicos de  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  e provetes cúbicos de  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ , os resultados obtidos pelo autor em ensaios experimentais apresentam uma média de 1.04 para idades de 7 dias, 1.02 para 14 dias de idade, 1.01 para 28 dias de idade e de 0.96 para outras idades.

- A mesma relação em ensaios experimentais não realizados pelo autor foi de 1.06 aos 28 dias de idade.

- A máquina de compressão utilizada influencia o valor da resistência à compressão, assim como a velocidade de aplicação de carga. Quanto maior a velocidade de aplicação de carga maior o valor de resistência à compressão obtida.

- A idade do betão não influencia a relação de resistência entre provetes cilíndricos e cúbicos e entre provetes cúbicos de arestas diferentes.

- O tipo de cura do betão não influencia a relação de resistência entre provetes cilíndricos e cúbicos e entre provetes cúbicos de arestas diferentes.

- Para desenvolvimentos futuros, deverão ser testados mais provetes cúbicos e cilíndricos com velocidades de aplicação de carga diferentes das estipuladas, e a sua influência nas relações de resistência à compressão.

- Deverá também ser feito um estudo para a influência do tipo de cura na relação de resistência à compressão entre provetes cúbicos de  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  e de  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ .



# Referências Bibliográficas

- [1] NP EN 206-1 – Betão. Parte 1: Especificação. Desempenho, produção e conformidade. IPQ: Instituto Português da Qualidade, 2007.
- [2] N. P. B, Cube and cylinder compressive strengths of waste plastic fiber reinforced concrete, *Int. J. Civ. Struct. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 174–182, 2013.
- [3] H. R. Kumavat and V. J. Patel, Factors Influencing the Strength Relationship of Concrete Cube and Standard Cylinder, *Ijitee*, vol. 3, no. 8, pp. 76–79, 2014.
- [4] M. Inácio, Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes e Betão de Elevada Resistência, Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [5] C. A. C. Marchão, Optimization and Design of Post-Tensioning Anchorage Corner Blister in Concrete Box Girder Bridges, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [6] NP EN 12390-3, Ensaio de Betão Endurecido Parte 3: Resistência à compressão de provetes de ensaio, p. 21, 2003.
- [7] Ho Wei Rong and David Ho, Strength of Concrete Cubes and Cylinders, pp. 1–6.
- [8] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, vol. 3rd. England, 1975.
- [9] Ceb-Fip, CEB-FIP Model Code 1990. Thomas Telford Publishing, 1993.
- [10] D. J. Elwell and G. Fu, Compression testing of concrete: cylinders vs. cube. p. 21, 1995.
- [11] H. F. Gonnerman H., Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete, *Proc. ASTM*, vol. 25, pp. 237–250, 1925.
- [12] Gyengo T., Effect of Type of Test Specimen and Gradation of Aggregate on Compressive Strength of Concrete, *J. Am. Concr. Inst.*, vol. 34, pp. 269–282, 1938.
- [13] R. H. Evans, The Plastic Theories for the Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams, *J. Inst. Civ. Eng.*, vol. 21, pp. 98–121, 1944.
- [14] H.W. Cormack, Notes on Cubes versus Cylinders, *New Zeal. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 98–99, 1956.
- [15] O.T. Sigvaldason, The influence of Testing Machine Characteristics Upon the Cube and Cylinder Strength of Concrete, *Mag. Concr. Res.*, vol. 18, no. 57, pp. 197–206, 1966.
- [16] A. M. Neville, A General Relation for Strengths of Concrete Specimens of Different Shapes and Sizes, *J. Am. Inst.*, vol. 63, no. 10, pp. 1109–1195, 1966.
- [17] T. Plowman, J.M. Smith, and W.F. Sheriff, Cores, Cubes and the Specified Strength of Concrete, *Struct. Eng.*, vol. 52, no. 11, pp. 421–426, 1974.
- [18] N.K. Raju, and B.S. Basavarajaiah, Experimental Investigations on Prismatic Control Specimens for Compressive, Flexural, and Tensile Strength of Concrete, *J. Inst. Eng.*, vol. 56, pp. 254–257, 1976.
- [19] V.R. Pancholi, Design Considerations, *Civ. Eng.*, p. 51,53,81, 1979.
- [20] F. Lasisi, J.A. Osunade, and A. Olorunniwo, Strength Characteristics of Cube and Cylinder Specimens of Laterized Concrete, *West Indian Jounal Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 50–59, 1987.
- [21] M. Imam, L. Vandewalle, and F. Mortelmans, Are current concrete strength tests suitable for high strength concrete?, *Mater. Struct.*, vol. 28, pp. 384–391, 1995.
- [22] W. C. Leung and K. S. Ho, Report on Strength Comparison of 100 mm and 150 mm cubes. Standing Committee on Concrete Technology: Materials Division: Public Works Central Laboratory, 1996.
- [23] Neville A.M. , *Properties of Concrete*, 2nd ed. London : Pitman, 1973.
- [24] Hong Kong Government, General Specification for Civil Engineering Works, no. Volume 1. Government Printer, Hong Kong, 1990.
- [25] Hong Kong Government, General Specification for Civil Engineering Works, vol. Volume 2. Government Printer, Hong Kong, 1990.
- [26] S.-T. Yi, E.-I. Yang, and J.-C. Choi, Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 236, no. 2, pp. 115–127, Jan. 2005.

- [27] A. S. Malaikah, Effect of Specimen Size and Shape on Drying Shrinkage of Concrete, King Saud University, 2005.
- [28] S. H. Alsayed, Sensivity of Compressive Strength of HSC to hot-dry Climate, Curing Regimes, and Additives., ACI J. - Am. Concr. Inst., pp. 472–477, 1997.
- [29] R. Krishna, R. Kumar, and B. Srinivas, Effect of size and shape of specimen on compressive strength of glass fiber reinforced concrete (GFRC), Facta Univ. - Ser. Archit. Civ. Eng., vol. 9, no. 1, pp. 1–9, 2011.
- [30] A. Ergün and G. Kürklü, Assessing the relationship between the compressive strength of concrete cores and molded specimens, Gazi Univ. J. Sci., vol. 25, no. 3, pp. 737–750, 2012.
- [31] L. Maia C. Caetano e M. Correira, Influência dos moldes dos provetes no ensaio de resistência à compressão do betão, pp. 24–26, 2012.
- [32] LNEC, Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão: Parte 1- 1: Regras gerais e regras para edifícios. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [33] N. Zabihi and Ö. Eren, Compressive strength conversion factors of concrete as affected by specimen shape and size, Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., vol. 7, no. 20, pp. 4251–4257, 2014.
- [34] British Standart, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens” CEN - European Committee for Standardization, Brussels, 2009.
- [35] ASTM International, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1. Jose B (INSUMA), United States, pp. 3–9, 2014.
- [36] Z. D. H. Mohammed Kareem Abd, Effect of Specimen Size and Shape on Compressive Strength of Self-Compacting Concrete, Pertanika Jounal Sci. Technol., vol. 7, no. 2, pp. 16–29, 2014.
- [37] A. K. Gupta, Experimental study of strength relationship of concrete cube and concrete cylinder using ultrafine slag Alccofine, vol. 5, no. 5, pp. 102–107, 2014.
- [38] R. Banarjee and Z. Ahmad, Study of Compressive Strength of Various Grades of Concrete using Different Sizes of Cubes, vol. 4, no. 7, pp. 475–480, 2015.
- [39] Indian Standart, Methods of Tests for Strength of Concrete. Bureau of Indian Standarts, New Delhi, 1959.
- [40] A. J. Hamad, Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres, J. King Saud Univ. - Eng. Sci., pp. 1–8, Sep. 2015.
- [41] BS EN 12390-3 - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens. London, UK, 2002.
- [42] ASTM Standarts, ASTM C39 - Standart Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standarts, 2003.
- [43] A. Costa and J. Appleton, Sebenta Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, Parte II - Materiais. 2002.
- [44] R. Ferreira, Avaliação de ensaios de durabilidade do betão, Universidade do Minho, 2000.
- [45] S. G., Influência dos Procedimentos de ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos no controle de qualidade do concreto, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [46] A. Antão, Mecânica dos Solos C. Monte da Caparica: Universidade Nova de Lisboa.
- [47] Faculdade de Ciencias e Tecnologia, Materiais de Construção - Ligantes para Argamassas e Betões, Monte da Caparica: Universidade Nova de Lisboa, 1996.
- [48] D. A. Abrams, Design of concrete mixures, Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute. Chicago, vol. Bulletin 1. 1918.
- [49] A. M. Neville, Properties of Concrete, 3rd ed. London: Harlow : Longman Scientific & Technical, 1981.
- [50] B. M., O betão : Definição , caracterização e propriedades, Lisboa, 2013.
- [51] R. D. Bloem, D.L. e Gaynor, Effects of aggregate properties on strength of concrete, ACI J. - Am. Concr. Inst., pp. 1429–1456, 1963.
- [52] A. de S. Coutinho, Fabrico e Propriedades do Betão Volume II, Lisboa, Laboratório

- Nacional de Engenharia Civil 1994.
- [53] M. Gutiérrez, P.A., Cánovas, High Performance Concrete: Requirements for constituent materials and mix proportioning, ACI J. - Am. Concr. Inst., pp. 233–241, 1996.
  - [54] NP EN 12620 – Agregados para betão. IPQ: Instituto Português da Qualidade, 2004.
  - [55] EN 13055-1 - Lightweight aggregates – Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout, 2002
  - [56] P. J. P. Cunha, Conformidade da resistência à compressão do betão, Universidade do Minho, 2011.
  - [57] NP EN 934-2 - Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem. 2009.
  - [58] U. do Algarve, Disciplina de Tecnologias do betão. Disponível em <http://w3.ualg.pt/~ealmeida/Tecnologia%20do%20bet%C3%A3o/TE%C3%93RICAS/Compacta%C3%A7%C3%A3o.pdf> [Acedido a 20 de Novembro de 2016]
  - [59] P. M. C. and R. L. Carrasquillo, Evaluation of the Use of Current Concrete Practice in the Production of High Strength Concrete, ACI Mater. J., vol. 85, no. 1, 1988.
  - [60] A.F.O. Almeida, M.M.G. Inácio, V.J.G. Lúcio, Punching Behaviour of RC Slabs Under Reversed Horizontal Cyclic Loading, Eng. Struct., vol. 117, no. 15, pp. 204–219, 2016.
  - [61] R. H. Júnior, Dry Joint Between Precast Concrete Elements, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2016.
  - [62] Prancheta do Engenheiro. Disponível em [http://pranchetadoengenheiro.blogspot.pt/2016\\_05\\_01\\_archive.html](http://pranchetadoengenheiro.blogspot.pt/2016_05_01_archive.html) [Acedido a 23 de Novembro de 2016]